

文章编号 1004-924X(2019)12-2534-08

复合光学导航敏感器

张 刘¹, 张若曦¹, 雷景文¹, 朱庆华², 王卫华², 朱 杨^{1*}

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200030)

摘要:针对单波段导航敏感器通常只能获取目标某一方面的信息, 所获信息量少、识别率低的问题, 提出一种共用孔径、多波段光学导航敏感器的设计。从光焦度分配理论出发, 给出了以主次反射镜为共用部分, 工作在不同视场的共口径光学系统的初始结构设计。可见光、红外和激光三个通道共用一个 Ritchey-Chretien 系统, 实现大口径的设计要求。为了实现可见光成像、红外成像与激光雷达探测功能, 在次镜表面镀制选择性透过光学薄膜, 将激光雷达的接收部分与成像系统分开。通过棱镜将 Ritchey-Chretien 系统的反射光路分为两路, 一路成像于可见光探测器, 一路成像于非制冷型长波红外探测器。设计结果表明, 可见光系统在 90 lp/mm 的 MTF 大于 0.4, 红外系统在 14.7 lp/mm 的 MTF 大于 0.4, 成像系统的传递函数接近衍射极限; 激光接收系统在距离探测器质心 30 μm 处的能量接收高达 90%, 在 -20~40 $^{\circ}\text{C}$ 成像质量良好。

关键词:光学设计; 导航敏感器; 可见光; 红外; 激光

中图分类号: O439; O435.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192712.2534

Composite optical navigation sensor

ZHANG Liu¹, ZHANG Ruo-xi¹, LEI Jing-wen¹, ZHU Qing-hua², WANG Wei-hua², ZHU Yang^{1*}

(1. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Jilin 130012, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200030, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuyang@jlu.edu.cn

Abstract: A design method for a common aperture and multi-band optical navigation sensor was proposed with the aim of solving the problem in which single-band navigation sensors can only get limited information from a target, as they have a low recognition rate. The design method of the initial structure of the common aperture optical system with primary and secondary mirrors as the common part and working in different fields of view was presented based on the theory of optical power distribution. Visible, infrared, and laser channels share a Ritchey-Chretien system to meet the design requirements of a large aperture. To realize the functions of visible imaging, infrared imaging, and LiDAR detection, the receiving part of the LiDAR was separated and the use of spectroscopic elements was reduced by the selective transmission of an optical film on the secondary mirror. The image of the Ritchey-Chretien system was divided into two paths by a prism; one was to the image photodetector and the other was to the image in the uncooled infrared detector. Through a large

收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-11-19.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0501000); 科技部重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0501003); 装备预研领域基金资助项目 (No. 61404140505); 上海航天科技创新基金资助项目 (No. SAST2018-046); 上海航天科技创新基金资助项目 (No. 11602145)

relative aperture, the radiation response of an uncooled detector was improved. The design results show that the Modulation Transfer Function (MTF) of the visible system is above 0.4 at 90 lp/mm, the MTF of the infrared system is above 0.4 at 14.7 lp/mm, the transfer function of the imaging system is close to the diffraction limit, and the energy of the laser receiving system is up to 90% at 30 μm from the center of the mass of the detector. The imaging quality of the system is suitable at $-20\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: optical design; navigation sensor; visible light; infrared; laser

1 引 言

现代社会对于导航传感器的要求越来越高,目前对目标的高精度跟踪以及测量,已成为导航传感器发展的主要趋势,因此对导航传感器的光学设计提出了更高的要求^[1]。单一谱段的光学系统无法实现不同波段的测量,且使用场景较为受限^[2]。可见光成像系统受外界环境干扰严重,在夜晚或光照条件不好的情况下无法清晰成像,同时无法检测隐蔽物体。红外光学系统具备了良好的抗干扰能力,同时还具有隐蔽性^[3-4]。然而,红外光学材料非常有限,且容易受环境温度影响^[5]。激光抗干扰能力强,信息容量大^[6]。为了获得更为丰富的探测数据,须通过不同的光学测量方式来获取目标的不同特性。复合光学系统综合了不同谱段光学系统的优势,可以减小光学系统尺寸^[6-8],对于导航传感器有着重要意义。

美国卡西尼(Cassini)探测器所采用的导航传感器虽然可以实现可见光与红外成像,但是整个光学系统的视场角小($0.5^\circ \times 0.5^\circ$),不具备近距离激光测距的功能^[7]。美国星尘(STARDUST)探测器所采用的导航传感器虽然具有较大视场($5.3^\circ \times 5.3^\circ$),但是只具备可见光成像功能,光照条件对成像质量会造成很大影响^[9]。北京航空航天大学郝云彩提出一种复合多视场光学导航传感器,利用四面镜结构实现对目标的观测^[10]。

为设计具有对移动目标的稳定跟踪和对目标的距离测量的多模式导航传感器,本文提出一种具有可见光成像、红外成像以及激光测距复合探测机制的宽波段光学系统。通过光学镀膜同时实现成像与测距功能;通过棱镜分光实现不同波段的同时成像,减小光学系统体积;利用高折射率材料减小高阶像差,缩短系统长度;利用元件材料、元件厚度、元件半径及元件间隔实现无热化设计。

最终结果表明,成像系统像质良好,激光接收部分能量集中度较高,光学结构紧凑,有利于结构的轻量化,具有一定的实用价值。

2 光学系统设计

2.1 主要的技术指标

可见光需要实现对于 M_v 等星的探测,其作用模型可描述为^[11]:

$$N_e = \frac{5 \times 10^{10} \times 10^{-\frac{2}{5}M_v} \times A \times T \times QE \times FF}{n_{\text{spread}}} \times t, \quad (1)$$

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{N_e}{\sqrt{N_e + I_d + \sum_i n_i^2}} \geq V_{\text{th}}, \quad (2)$$

其中:探测等星 M_v 为 6, A 为入瞳面积,光学系统的透过率 T 为 0.85,星像光斑在探测器上所占据的像元数 n_{spread} 为 9,曝光时间 t 为 2 ms, n_i 表示除光子噪声和暗电流噪声以外的噪声。根据探测器手册 $QE \times FF$ 取 60%,光子噪声为 $\sqrt{N_e}$,暗电流噪声为 $\sqrt{I_d}$,读出噪声为 n_{Read} 。

红外成像系统的作用距离可以描述为^[12]:

$$R^2 = \frac{\delta \cdot \left| \frac{L_t - L_{\text{bg}}}{N_t} \right| \cdot A_t \cdot A_0 \cdot \tau_a \cdot \tau_0 \cdot D^*}{(A_d/2t_{\text{int}})^{1/2} \cdot \text{SNR}}, \quad (3)$$

其中:红外成像系统的作用距离 R 取 15 km;信号提取因子 δ 取 0.7,目标的辐射亮度 L_t 取 $2.59 \times 10^{-3} \omega \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})^{-1}$; τ_a 是大气透过率;系统信噪比 SNR 取 9;探测器积分时间 t_{int} 取 2 ms;光学系统的透过率 τ_0 取 0.85;背景辐射亮度 L_{bg} 取 $1 \times 10^{-3} \omega \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})^{-1}$;目标有效辐射面积 A_t 取 1 m^2 ;物体在焦平面上所占像元数 N_t 取 9;探测器单个像元面积为 A_d ,单个像元尺寸取 17 μm ; A_0 是光学系统的入瞳面积;探测器的探测率 $D^* = 1.16 \times 10^{10} \omega \cdot (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}}/\text{W})^{-1}$ 。

在激光测距单元,系统相当于斜程小目标测距,测距方程为可描述为^[13-14]:

$$P_{r\min}(R) = \frac{4 \cdot P_t \cdot A_s \cdot A_r \cdot \rho \cdot K \cdot T^2}{\pi^2 \cdot \theta_t^4 \cdot R_{\max}^4}, \quad (4)$$

其中:最小可探测功率 $P_{r\min} = 10^{-8}$ W;发射功率 P_t 为 20 kW;目标面积 A_s 为 1 m^2 ; A_r 为接收面积;光学系统透过率 K 为 0.85;漫反射目标反射率 ρ 为 0.2;双程大气透过率 T^2 为 0.2;目标反射光束角 θ_t 取 1 mrad; R_{\max} 为最远作用距离。

在不考虑光学遮拦的情况下,由式(1)~式(2)计算可得满足信噪比情况下系统的最小入瞳直径,为 70 mm。对于长波红外系统,在不考虑遮拦的情况下,由式(3)计算得到入瞳直径为 66 mm,同轴两镜系统的最大遮拦比为 0.3。考虑到机械加工带来的遮拦问题,可见光系统能实现 6 等星探测,红外系统能实现 15 km 探测,入瞳直径最终取 80 mm。最终的光学设计指标如表 1 所示。

表 1 复合光学导航敏感器的光学系统设计参数

Tab. 1 Design parameters of optical systems for composite optical navigation system

Parameter	Visible	Infrared	Laser
Wavelength/ μm	0.4~0.75	7.5~12	1.064
Focal length/mm	300	201	240
F#	3.75	2.5	3
Field of view/ $^\circ$	2	2	0.2

2.2 光学系统结构设计

一般情况下,光学设计需要知道光学元件的半径、厚度、间隔及材料等结构参数。对于两镜系统而言,主次镜光焦度与结构参数有一定关系,可以通过光焦度分配来计算初始结构,透镜焦距的计算公式如下^[15]:

$$f' = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{(n_1 - n_0)t - n_1 [(n_2 - n_1)r_1 + (n_1 - n_0)r_2]}, \quad (5)$$

其中: r_1, r_2 为透镜两面的曲率半径, n_0, n_1, n_2 为 3 个区域的折射率, t 为透镜的轴向厚度。

反射镜焦距计算公式为^[15]: $f = -\frac{R}{2}$, 其中 R 为反射镜曲率半径。

光学系统光焦度 $\Phi = \frac{1}{f}$, 理想情况下 $t=0$, 对

于平凸透镜 $f_{\text{plano-convex}} = -\frac{r}{n-1}$, 其中 r 为平凸透镜半径。

透镜光焦度分配公式如下^[13]:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2. \quad (6)$$

由图 1 光路计算反射光路光焦度,得到:

$$\Phi_{\text{refraction}} = \frac{n'_1 - n_1}{R_1} + \frac{n'_2 - n_2}{R_2} - d \frac{(n'_1 - n_1)(n'_2 - n_2)}{R_1 R_2}. \quad (7)$$

折反光路光焦度为:

$$\Phi_{\text{catadioptric}} = \frac{n'_1 - n_1}{R_1} - \frac{n_3 - n_1}{R_2} - d \frac{(n'_1 - n_1)(n_3 - 1)}{R_1 R_2}. \quad (8)$$

由式(7)~式(8)可知, $\Phi_{\text{refraction}} < \Phi_{\text{catadioptric}}$, 即 $f_{\text{refraction}} > f_{\text{catadioptric}}$, 折反系统的最大焦距为主镜焦距。

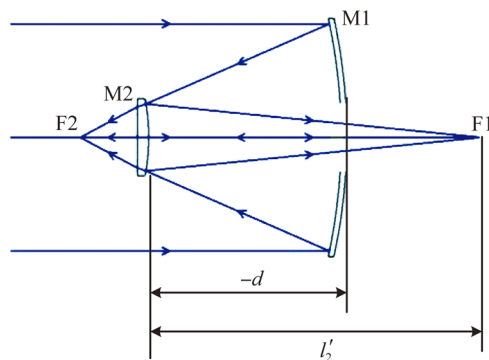


图 1 两镜系统光路结构

Fig. 1 Optical path of two-mirror system

在满足光焦度分配原则的同时也要考虑光学结构的合理性。以本设计为例,光学系统在空气中 $n'_1 = n_2 = -1, n_1 = n'_2 = 1$ 。激光接收光路得常用材料为融石英、BK7 等,折射率在 1.46~1.52,取 $n_3 = 1.5$ 。 d 为两镜间隔。需要考虑分光元件与校正镜组的长度,需满足条件: $l'_2 > |d|$,一般取 $l'_2 = (1.3 \sim 1.7)|d|$ 。同时需要使系统遮拦比不超过 0.3。通过不断调整 R_1, R_2 与 d 的取值,并通过多次优化迭代,依据工程经验,当 $f_{\text{refraction}} = 400 \text{ mm}, f_{\text{catadioptric}} = 80 \text{ mm}$ 时,系统可以同时兼顾成像质量与合理的空间结构布局。主次镜的面形系数 e_1^2, e_2^2 为^[16]:

$$c_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (9)$$

$$c_2^2 = \left[\frac{2\beta/(1-\alpha) + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \right]. \quad (10)$$

计算得出非球面系数,光学系统的初始结构如表 2 所示。

表 2 光学系统的初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters of optical system

	Radius/mm	Distance/mm	Conic
PM	-192.000	68.064	-1.050
SM	-73.320	117.393	-3.002

2.3 光学设计方案

常见多波段共光路系统大多采用多个分光元件,但这种情况多用于后截距较大的光学系统,根据系统要求 F 数,本系统后截距较小,不适合在主镜之后使用多个分光元件。同轴两镜系统本身存在中心遮拦,会遮挡部分光线,为了充分利用两镜系统的空间结构,选择将单波段、小视场的激光测距接收单元放置在次镜前端,通过光学镀膜实现分光。在该光学系统中,激光、红外以及可见光共用 R-C 结构,为保证紧凑性,系统分为前光路与后光路两大部分。将激光测距雷达接收像面置于前光路中。入射光经过主镜反射后入射到次镜,在次镜表面镀选择性透过光学薄膜,该薄膜只能透过 1 064 nm 波长的光,可见光与长波红外光在次镜表面反射,进入后光路,激光在次镜表面透射,形成前光路。激光接收光路与次镜共用一个镜筒,通过 3 点支撑的方式支撑在主镜背板上,激光光路校正透镜直径均小于次镜直径,仅次镜会遮挡光路,激光校正光路不会影响光路。依照常规光线传播顺序,入射光经过主镜与次镜反射后,进入后光路部分,主镜后放置立方棱镜,棱镜斜面镀选择性透过光学薄膜,使 450~750 nm 可见光波向下反射,形成可见后光路,经过校正镜组校正像差,成像于可见光探测器。使 7.5~12 μm 红外光波向后透射,形成红外光后光路,经过校正镜组校正像差,最终成像于红外探测器。

本设计采用光学被动补偿方法,通过光学材料减小温度等对焦距像质的影响,匹配光学材料,使各个影响因素的作用相互补偿,实现稳定成像。相对于可见光光学系统,红外系统的可选材料少,

同时受温度影响较大,最终采用 Ge 对红外光学系统进行校正。

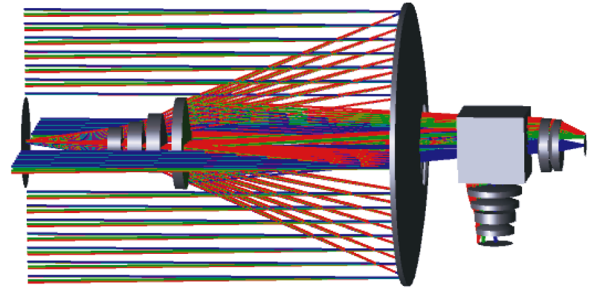


图 2 复合光学导航敏感器的光学系统设计

Fig.2 Schematic diagram of optical system for composite optical navigation system

3 像质评价与分析

激光接收光学系统的主要原理是汇聚经过物体反射回来的激光于接收平面上,激光接收部分不是成像系统,相对于成像光学系统,激光接收系统主要考虑其能量接收问题。由于激光接收系统接收单色激光,不用考虑色差校正问题,前端与成像系统公用,只用加入校正镜满足 F 数要求,同时控制能量分布,能量分布如图 3 所示。

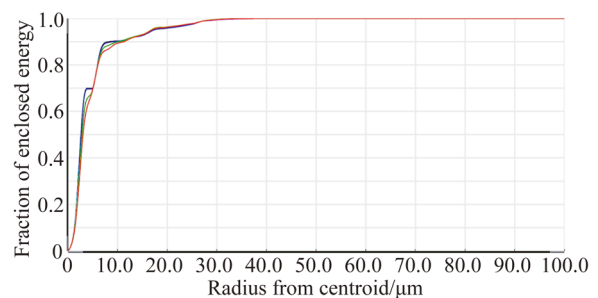


图 3 激光接收系统包围能量

Fig.3 Encircled energy of laser receiving system

从能量分析可以看出,在距离探测器质心 30 μm 处能量接收接近 100%,小于探测器尺寸 200 μm 。

成像光学系统的像质评价有很多方法,但是各种方法的使用范围都有一些局限性,对应于不同的设计要求就要利用不同的设计方法。图 4、图 5 和图 6 分别为红外光学系统的 MTF 曲线,点列图和场曲畸变。

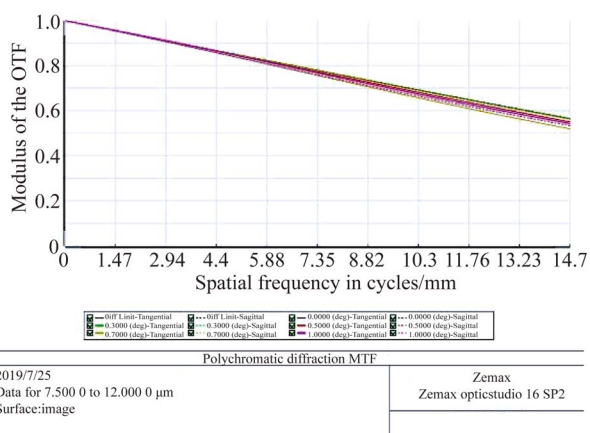


图 4 红外光学系统 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of infrared optical system

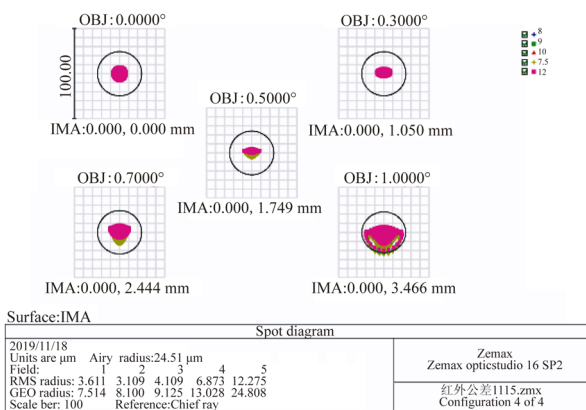


图 5 红外光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of infrared optical system

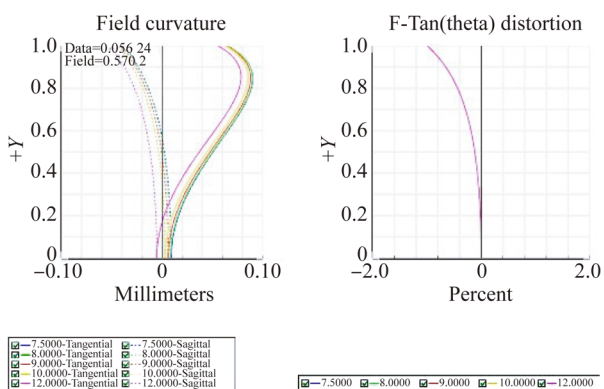


图 6 红外光学系统的场曲和畸变

Fig. 6 Field curvature and distortion of infrared optical system

由图 4、图 5 和图 6 可知,红外通道的光学传递函数在 14.7 lp/mm 处的数值在全视场内均大于 0.4,接近衍射极限;各视场下的弥散斑直径均小于一个像元尺寸 17 μm ;红外通道的场曲和畸

变全视场内在 $\pm 1\%$ 以内。以上成像性能分析说明,中波红外通道具有较好的成像质量,能够满足系统成像要求。

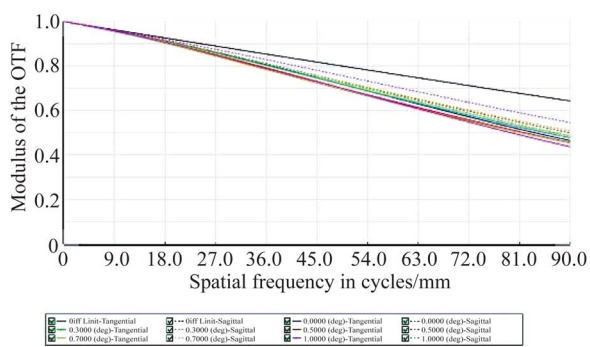


图 7 可见光系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of visible optical system

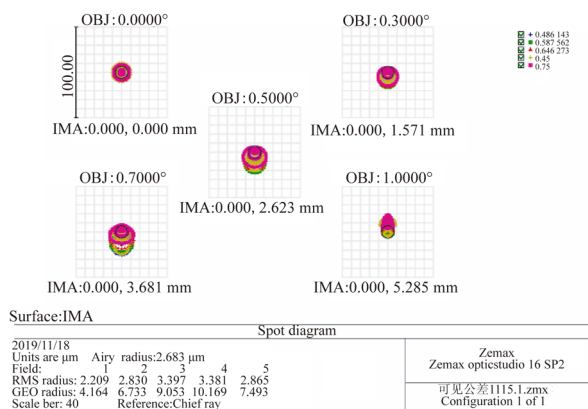


图 8 可见光系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of visible optical system

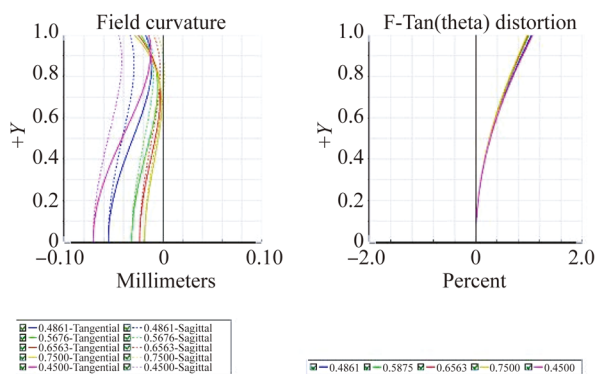


图 9 可见光系统的场曲和畸变

Fig. 9 Field curvature and distortion of visible optical system

由图 7、图 8 和图 9 可知,可见光系统的传递函数在 91 lp/mm 处的数值在全视场内均大于 0.4;全视场 RMS 最大弥散小于一个像元尺寸 5.5 μm;可见光通道的场曲和畸变全视场内在

±0.5% 以内。以上成像性能分析说明,可见光系统具有较好的成像质量,能够满足系统成像要求。

光学系统的工作温度为 -20~40 °C,对光学系统进行温度分析,结果如图 10 和图 11 所示。

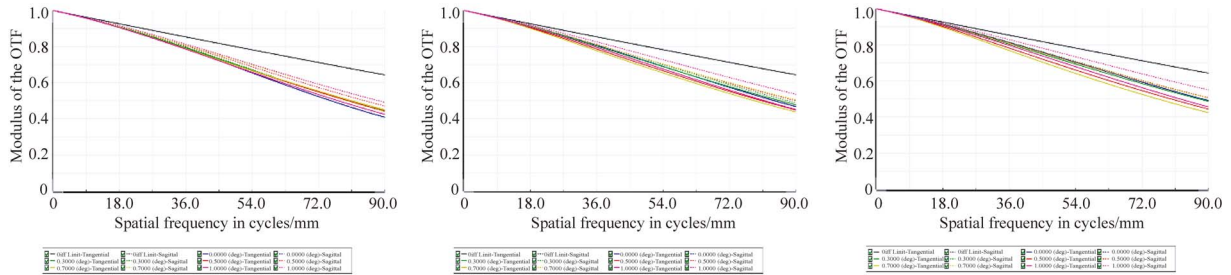


图 10 可见光系统在 -20,20,40 °C 的光学传递函数

Fig. 10 Modulation transfer functions of visible light system at -20,20 and 40 °C

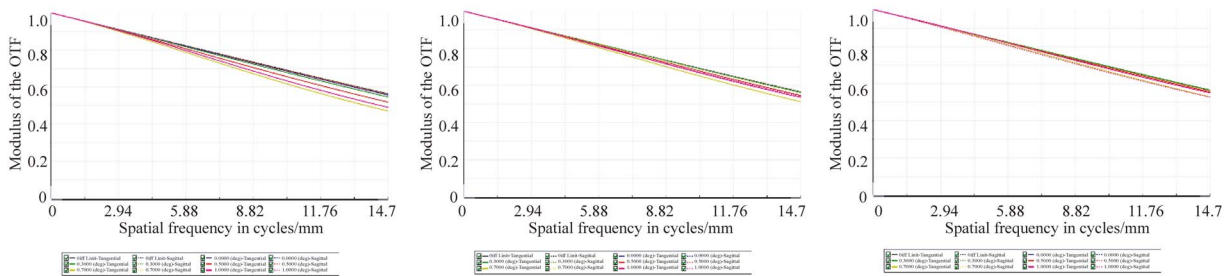


图 11 红外系统在 -20,-20,40 °C 的光学传递函数

Fig. 11 Modulation transfer functions of infrared system at -20,-20 and 40 °C

由图 10 和图 11 可知,可见光成像系统在 -20~40 °C 时,90 lp/mm 处的 MTF 值均在 0.4 以上,成像质量良好,传递函数下降小于 0.05,受温度影响不大。长波红外成像系统在 -20~40 °C 时,14.7 lp/mm 处的 MTF 值均在 0.45 以上,成像质量良好,光学传递函数下降 0.05,受温度影响不大。在工作温度范围内,光学成像系统可以清晰成像。

4 公差分析

实际加工、装调会影响光学系统的成像质量,故光学系统在设计完成之后,还需制定合理的公差。通过 Zemax 软件分析公差,将系统衍射 MTF 的平均值作为公差敏感度,进行 500 组蒙特卡罗分析,得到公差分配见表 3,分析结果见表 4 和表 5。

表 3 公差分析

Tab. 3 Tolerance analysis

Tolerance	Range
Radius(frings)	±2
Thickness/mm	±0.02
Decenter/mm	±0.02
Tilt/(°)	±0.01
P-V/μm	3

表 4 可见光系统公差分析结果

Tab. 4 Tolerance analysis results of visible system

Sampling probability/%	Diff. MTF Avg.
90	0.326 402 19
80	0.387 486 99
50	0.439 389 71
20	0.467 282 32
10	0.471 442 41

表 5 红外系统公差分析结果

Tab. 5 Tolerance analysis results of infrared system

Sampling probability/%	Diff. MTF Avg.
90	0.548 884 07
80	0.550 422 98
50	0.553 513 06
20	0.556 601 35
10	0.557 460 54

从表 4 可以看出,应用本文的公差分配容限,可见光系统的 MTF 值有 90% 的概率超出 0.32,说明系统公差对成像质量的影响不是很大。从表 5 可以看出,红外系统的 MTF 值有 90% 的概率超出 0.54,说明系统公差对成像质量的影响较小。

参考文献:

- [1] 刘兴潭,吴奋陟,武延鹏. 小行星光学导航传感器技术发展趋势 [J]. 光学精密工程, 2017,25(12z): 1-17.
LIU X T, WU F ZH, WU Y P. Development trend of optical navigation sensor technology for asteroid exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (12z): 1-17. (in Chinese)
- [2] 钱林青,金伟其,郭宏. 可见光/长波红外共聚焦窗口望远物镜设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 246-250.
QIAN L Q, JIN W Q, GUO H. Design of a millimeter wave/laser/infrared common aperture compound optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (9): 246-250. (in Chinese)
- [3] 张葆,崔恩坤,洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 395-401.
ZHANG B, CUI E K, HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)
- [4] 白瑜,廖志远,廖胜,等. 共孔径消热差红外双波段光学系统 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 268-277.
BAI Y, LIAO ZH Y, LIAO SH, *et al.*. Infrared dual band athermal optical system with common aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 268-277. (in Chinese)
- [5] THOMPSON, ALLAN N. Optical design of com-

5 结 论

本文设计了一种可见光/红外/激光雷达共光路光学导航敏感器,该光学系统具有体积小、质量轻、稳定性好的特点。系统为 R-C 折反射结构,采用镀膜方式对 3 种不同波段的光路进行分光。对光学系统进行优化,通过对点列图、传递函数和畸变进行分析,可知系统成像质量良好。可见光系统的 MTF 在 90 lp/mm 时达到 0.4 以上,红外系统的 MTF 在 14.7 lp/mm 时达到 0.4 以上,激光接收系统在距离探测器质心 30 μm 处的能量接收到达 90%。该复合光学系统在 -20~40 $^{\circ}\text{C}$ 工作时成像质量良好,可同时实现可见光成像、红外成像与激光雷达探测功能。

- mon aperture, common focal plane, multispectral optics for military applications [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6):061308. (in Chinese)
- [6] 任峰,张志杰,付贝贝,等. 宽光谱大视场光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10s): 66-71.
REN F, ZHANG ZH J, FU B B, *et al.*. Design of optical system with wide spectrum and large field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10s): 66-71. (in Chinese)
- [7] 刘峰,沈同圣,马新星,等. 基于多波段深度神经网络的舰船目标识别 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2939-2946.
LIU F, SHEN T SH, MA X X, *et al.*. Ship recognition based on multi-band deep neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2939-2946. (in Chinese)
- [8] 金光,李艳杰,钟兴,等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8): 2067-2074. (in Chinese)
- [9] JU Y J, LEE K H, JO J H. Optical design of a reflective omnidirectional optical system to be used simultaneously in visible and LWIR wavelength range [C]. *Optical Design and Engineering VII. International Society for Optics and Photonics*, 2018, 10690: 106901X.
- [10] 郝云彩. 空间光学敏感器技术进展与应用 [J]. 空

- 间控制技术与应用,2017,43(4):9-18.
- HAO Y C. Technical progress and application of space optical sensor [J]. *Aerospace Control and Application*,2017,43(4):9-18. (in Chinese)
- [11] 江洁,郑佳怡,凌思睿. 新型复合多视场光学敏感器及其导航方法 [J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(1):1-7.
- JIANG J,ZHENG J Y,LING S R. A new composite multi-field-of-view optical sensor and its navigation method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2016,42(1):1-7. (in Chinese)
- [12] 董瑛,邢飞,尤政. 基于 CMOS APS 的星敏感器光学系统参数确定 [J]. 宇航学报,2004(6):663-668.
- DONG Y,XING F,YOU ZH. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor [J]. *Journal of Astronautics*,2004(6):663-668. (in Chinese)
- [13] 高明,许黄蓉,刘钧,等. 折/衍射双波段共光路齐焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程,2017,46(5):165-174.
- GAO M,XU H R,LIU J, *et al.*. Design of diffractive-refractive dual-band co-path parfocal optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2017,46(5):165-174. (in Chinese)
- [14] 田铁印. 激光测距跟踪系统作用距离方程的探讨 [J]. 光学精密工程,1996(1):33-36.
- TIAN T Y. Discussion on the action distance equation of laser ranging and tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*,1996(1):33-36. (in Chinese)
- [15] 郭豪,邱琪,马娜,等. 不同能见度下激光测距仪最大测程的数值算法 [J]. 红外与激光工程,2013,42(12):3330-3334.
- GUO H,QIU Q,MA N, *et al.*. Numerical algorithm for maximum range of laser rangefinder in different visibility [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(12):3330-3334. (in Chinese)
- [16] [德]马克斯·玻恩,[美]埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 北京:电子工业出版社,2009:145-146.
- BORN M,CLEMMOW P C. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2009:145-146. (in Chinese)
- [17] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004:15.
- PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Sunzhou: Soochow University Press,2004:15. (in Chinese)

作者简介:



张 刘(1978—),男,安徽蚌埠人,教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事航天光学遥感系统设计、仿真及应用,星敏感器等技术的研究。E-mail: zhangliu@jlu. edu. cn



朱 杨(1989—),男,黑龙江齐齐哈尔人,讲师,2016年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计与仿真分析的研究。E-mail: zhuyang@jlu. edu. cn