

多谱段共孔径跟踪/引导系统光学设计

贾冰,曹国华,吕琼莹,丁红昌

(长春理工大学机电工程学院,吉林 长春 130033)

摘要: 共孔径光学结构可以充分利用长焦距、大孔径光学系统高分辨率的特点,是光学系统发展的重要方向之一。文中设计了一套可见光成像、激光成像和激光测高共孔径的跟踪引导系统。共孔径设计结合了高分辨率的可见光系统与高测量精度的激光系统,使系统既可以获得目标的高清图像,又可以得到目标的相对位置信息。同时,共孔径光学结构可以压缩系统尺寸,降低光学系统在跟踪过程中的转动惯量,有利于系统的整体实现。可见光子系统的焦距 1 200 mm, F 数 6, 视场 $\pm 1.2^\circ$; 1 064 nm 激光成像子系统焦距 1 500 mm, F 数 7.5。各系统的成像质量均接近衍射极限,并通过公差分析验证了系统的公差分配结果。

关键词: 光学设计; 卡塞格林天线; 共孔径光学系统; 跟踪引导系统

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0218001

Optical design of tracking/guiding system with multi-spectrum and common aperture

Jia Bing, Cao Guohua, Lv Qiongying, Ding Hongchang

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China)

Abstract: One of the important direction of the optical system is the co-aperture optical system, which takes advantage of optical system characters with long-focus and high resolution. This paper designed a tracking guiding system whose aperture of the optical system for visible light imaging, laser imaging and laser ranging was shared. The co-aperture design combined the high resolution visible light system with high resolution laser system, which made the system not only obtain high-definition images, but also get the relative location information. The co-aperture optical system could compress system size, reduce the rotational inertia when the optical system was in the process of tracking for the overall implementation of the system. The focal length of visible light subsystem is 1 200 mm; F number is 6; field of ± 1.2 . The focal length of laser imaging subsystem is 1 500 mm; F number is 7.5. Each system imaging quality is close to the diffraction limit, and tolerance allocation results is verified by tolerance analysis.

Key words: optical design; Cassegrain antenna; co-aperture optical system; tracking guiding system

收稿日期:2016-06-07; 修订日期:2016-07-12

基金项目:国家 863 计划(2013AA2400)

作者简介:贾冰(1987-),女,博士生,主要从事激光雷达及光学检测技术方面的研究。Email:13596154862@163.com

导师简介:曹国华(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达及光学检测相关研究。Email:caoguohua@cust.edu.cn

0 引言

随着航天技术的发展,不同种类、型号和尺寸的飞行器日益增多。为了实现对目标进行准确的识别、跟踪或引导,除了需要获得目标的清晰图像外,还需要得到目标的相对位置信息。目前国内外应用较为广泛的是激光成像雷达,其具有大气穿透性强、跟踪精度高及可获得目标距离等一系列优点,但其工作距离相对较短,且系统视场一般很小^[1-2]。为了弥补激光成像雷达这一不足,有必要将高分辨率、大视场的可见光系统与激光成像雷达相结合,同时采用共孔径的光学结构形式,使复合跟踪系统具有更广泛的应用前景。

多谱段共孔径跟踪引导光学系统分别采用可见光波段(380~750 nm)及近红外 1 064 nm 激光器进行成像,采用 1 550 nm 脉冲激光器测量目标距离。因此,其光学系统需要满足各波段成像质量要求。在光学结构方面,可见光与近红外共孔径的折射系统需要采用特殊的光学材料且结构复杂,对材料的选取及系统的加工与装调要求极高;反射系统不存在色差,同时可以采用离轴(即离轴反射式系统)以扩大系统的视场,但多路反射系统体积相对较大,增加了系统的转动惯量,对光机系统的各项指标也相对严格;而折反射系统作为折射式与反射式的折中方案,通过增加透镜组,既可以扩大反射式系统的视场,又可以增加变量对系统的轴外像差进行校正,系统的整体结构也相对紧凑^[3-4]。文中根据任务要求,设计了一种同轴折反射式多谱段共孔径光学系统,对系统的结构参数、成像质量及系统公差进行了深入分析和较为详细的论述。

1 光学系统结构参数确定

1.1 可见光成像系统

可见光系统的光学结构参数可以由公式(1)~(5)进行计算^[5]:

$$f=Ra/\varepsilon \quad (1)$$

$$\theta_e=af \quad (2)$$

$$\theta_o=1.22\lambda/D \quad (3)$$

$$\theta_o \leq \theta_e \quad (4)$$

$$W=2R\tan\omega \quad (5)$$

式中:探测距离 R 为 60 km;可见光探测器像元尺寸 a 为 $7 \mu\text{m}$; ε 为系统的分辨率, $\varepsilon=0.35\text{m}$; f 为焦距, $f=1\ 200 \text{ mm}$; λ 为参考波长, $\lambda=0.532 \text{ nm}$; 要求光学系统的角分辨率 θ_e 高于像元角分辨率 θ_o ; D 为入射光瞳口径, $D=200 \text{ mm}$;要求在 60 km 处成像面的覆盖宽度 W 超过 2 km;视场角为 $2\omega=\pm 1.2^\circ$ 。系统在奈奎斯特频率 $\rho_N(\rho_N=1/2a=71.4 \text{ lp/mm})$ 处的设计传函 $MTF_{\text{design}}(\rho_N)$ 可以表示为^[6]:

$$MTF_{\text{design}}(\rho_N)=\frac{MTF_{\text{static}}(\rho_N)}{MTF_{\text{alignment}}MTF_eMTF_{\text{sample}}(\rho_N)} \quad (6)$$

式中:加工装调传函 $MTF_{\text{alignment}}$ 取 0.85;电子线路的传函 MTF_e 取 0.9;采样过程的传函 $MTF_{\text{sample}}(\rho_N)$ 取 0.64;通常要求 $TF_{\text{static}}(\rho_N) \geq 0.2$ 。因此,光学设计传函 $MTF_{\text{design}}(\rho_N)$ 应大于 0.408。

1.2 激光成像系统

根据激光雷达点目标成像方程,系统接收到的功率可以表示为^[7]:

$$P_r=\frac{P_t A_0 \rho D^2}{\pi R^4 \theta^2} \tau_{\text{Atm}} \tau_{\text{optical}} \quad (7)$$

式中: P_r 为系统接收功率 (W); P_t 为激光器发射功率 (W); A_0 为目标反射截面积,为了适应更多型号的飞行器,文中选取目标的反射面积为 1 m^2 ,同时考虑实际成像过程中目标不能与一个像元完全重合,在计算分析中通常取 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 范围内,则单个像元对应的面积为 $1 \text{ m}^2/4=0.25 \text{ m}^2$; ρ 为目标的平均反射系数,取 $\rho_{1064}=0.32$; θ 为激光器的束散角, $\theta=0.5 \text{ mrad}$,即 60 km 处的激光光斑直径约为 30 m; τ_{Atm} 为大气透过率,根据 Lowtran7 对 60 km 斜程的仿真结果, $\tau_{\text{Atm}}=0.5917$; τ_{optical} 为光学系统透过率,由于系统内部采用分光棱镜进行分光,因此 τ_{optical} 取 0.5。

将上述参数带入公式(7),假设探测器最低探测功率为 10^{-7} W ,可以计算出当口径为 200 mm,在斜程距离为 60 km 处 0.25 m^2 的目标需要发射激光器的功率最大峰值功耗为百兆瓦量级^[8]。

激光接收系统参数可以通过高斯公式和垂轴倍率公式进行确定^[9]:

$$\frac{f'}{l'}+\frac{f}{l}=1 \quad (8)$$

$$\beta = \frac{y'}{y} + \frac{nl'}{n'l} \quad (9)$$

式中： f 、 f' 分别为系统的物方焦距和像方焦距； l 、 l' 分别为系统的物方截距和像方截距； y 、 y' 为物高和像高； n 、 n' 为折射率， $n=n'=1$ 。激光成像系统在 60 km 处的视场为 30 m，分辨率为 2 m，对于光纤直径为 50 μm 的探测器可以得到： $l=60$ km， $y=2$ m， $y'=50$ μm ， $l'=1.5$ m。从公式(9)中可以看出 $f \ll l$ ，因此激光接收系统的焦距 $f'=l'=1.5$ m。

为了实现系统的收发一体化，同时充分利用主光学系统以减小系统尺寸，在同轴光学系统次镜后部增加一个斜 45° 放置的平面反射镜，对发射光路进行折转。激光发射光路主要包括三路：成像激光器(1 064 nm)、测高激光器(1 550 nm)以及补偿可见光成像照度激光器(532 nm)。考虑到同轴光学系中心遮拦会引起能量损失，为了将能量损失控制在 10% 左右，取激光发射系统的口径 $D_e=50$ mm。而对于激光准直系统而言，其数值孔径 NA 一般要求小于 0.2，数值孔径与 $F\#$ 的关系可以表示为：

$$NA = \frac{1}{2F\#} = \frac{D}{2f_e} < 0.2 \quad (10)$$

根据上式可以得到激光发射系统的焦距 $f_e > 125$ mm，文中取激光发射系统的焦距 $f_e=150$ mm。

系统主光学结构采用同轴两反射式系统，该形式的初始结构参数的计算方法已十分成熟^[10-11]，在此不再赘述。通过上文的分析，最终得到多谱段共孔径跟踪引导光学系统主要设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of optical systems

Parameters	Visible subsystem	Laser receiving subsystem	Laser emission subsystem
Focal length/mm	1 200	1 500	150
Aperture/mm	200	200	50
Field of view/(°)	±1.2	±0.014 5	-
Pixel size/ μm	7×7	50	-
MTF _{design} (ρ_N)	≥0.408	≥0.408	-

2 系统优化设计

结合上文对不同光学形式的对比，最终采用前置同轴两反系统、分光镜加后置折射系统的光学结

构形式，以实现可见光子系统与激光光子系统 1 200 mm 和 1 500 mm 长焦距成像。在优化过程中，通过增加主镜(M1)、次镜(M2)的二次曲面常数和次镜的六次非球面系数来增加优化变量，能够保证在减小系统像差的基础上适当增加视场，同时保证 MTF 接近衍射极限。

由于同轴两反系统校正像差能力有限，系统的初始结构中球差和彗差相对较小，而像散和场曲相对较大，为了平衡反射系统的场曲及其他像差，同时保证各子系统成像质量，在主镜后部增加中继镜组以校正反射系统的像差。考虑到反射系统为正光焦度系统，因此中继镜组中应采用负光焦度光学元件以平衡反射系统所产生的场曲，同时增加正光焦度光学元件以补偿负光焦度所产生的正彗差，因此中继镜组拟采用两片光学元件。而各子系统中，为了保证成像质量并降低装调难度，拟采用与中继镜组对称的结构形式(整体近似于双高斯镜头)。这种近似结构可以矫正彗差、畸变和倍率色差这三种垂轴像差，同时平衡球差、像散、场曲和位置色差这四种轴向像差。

在结构排布上，为了尽可能压缩系统尺寸，充分利用共孔径光学系统，在次镜背部放置平面反射镜对发射光路进行折转。由于系统存在旋转对称的中心遮拦，导致亮度下降、MFT 曲线下降并重新分布。因此优化过程中在保证成像质量的要求下，尽可能平衡发射光路口径与遮拦比之间的关系，尽可能减少次镜对主镜的中心遮拦^[12]。

3 设计实例

结合上文对不同光学形式的对比，最终采用前置的同轴两反系统、分光镜加后置的折射式系统的光学结构形式，可见光子系统的结构参数如表 2 所示，系统焦距为 1 200 mm，孔径为 200 mm， $F\#$ 为 6，孔径光阑位于次镜，视场为 2.4°。

光学系统的整体结构形式如图 1 所示。考虑到系统的实际工作过程，在系统入口处增加保护玻璃(1)，可见光谱段的光路顺序为：保护玻璃(1)，主镜(2)，次镜(3)，中继镜组(4)，棱镜(5)，可见光中继镜组(6)。在通过棱镜(7)对 1 064 nm(8)和 1 550 nm(9)两路进行分光。发射光路的平面反射镜(11)位

表 2 可见光子系统结构参数

Tab.2 Structural parameters of visible subsystem

Surface	Radius/mm	Thick-ness/mm	Glass	Conic	6th order coefficients
1	Infinity	11	HK9L	-	-
2	Infinity	220	-	-	-
M1	-615.8	-190	-	-1	-
M2 (stop)	-337.9	230	-	-3.483 2	-2.224 3 $\times 10^{-15}$
5	68.8	10	HBAK2	-	-
6	Infinity	8.7	-	-	-
7	Infinity	5	HZK21	-	-
8	56.9	26	-	-	-
9	Infinity	25.4	NBK7	-	-
10	Infinity	25.4	NBK7	-	-
11	Infinity	25	-	-	-
12	-73.2	15.8	HZF3	-	-
13	-158	0.1	-	-	-
14	771.6	5.5	HZF6	-	-
15	262.6	3	-	-	-
16	Infinity	4	HK9L	-	-
17	Infinity	30.2	-	-	-

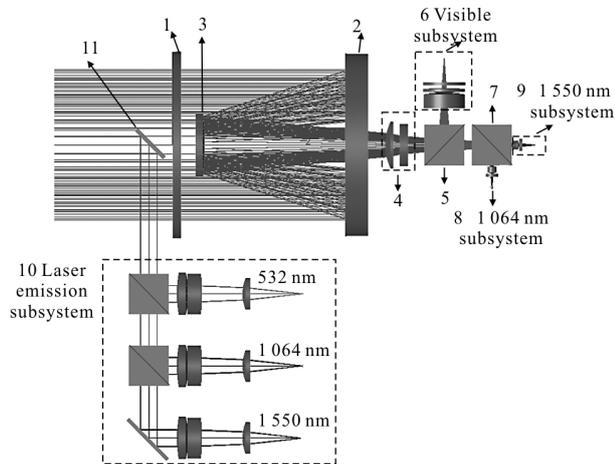


图 1 光学系统结构示意图

Fig.1 Layout of optical system

于次镜背部,激光发射系统位于成像系统下部。在激光发射系统(10)增加可见光激光器(532 nm),对可见光成像进行照明补偿。1 064 nm 和 1 550 nm 成像子系统的结构参数如表 3 所示,光学结构如图 2 所示,光学结构采用与中继透镜近似的结构形式,并在焦平面前增加滤光片以减小杂散光的影响,为

了便于加工透镜材料均为 HZF6,滤光片材料为 HK9L。最终得到系统总长为 $f'/2.4$,宽度为 $f'/5.5$,高为 $f'/4.6$,系统结构紧凑。

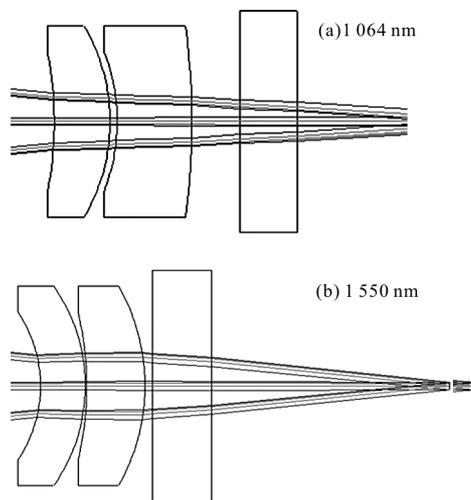


图 2 激光光子系统结构布局

Fig.2 Layout of laser subsystem

4 光学性能分析

光学系统的视场为 $\pm 1.2^\circ$,为对称视场,选择 0° 、 0.6° 、 0.84° 和 1.2° 4 个视场角对光学系统的性能进行评价。根据次镜口径及支撑杆的宽度,给出了对像质产生影响的遮拦部分面积,如图 3 所示。图中阴影部分为次镜及支撑杆所产生的遮拦,次镜口径为 80 mm,主镜口径为 220 mm,支撑杆宽度为 4 mm。可见光成像系统与激光成像系统的点列图及 MTF 曲线如图 4、图 5 所示。

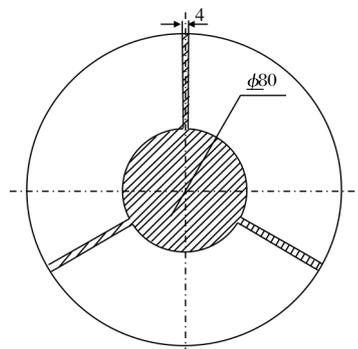
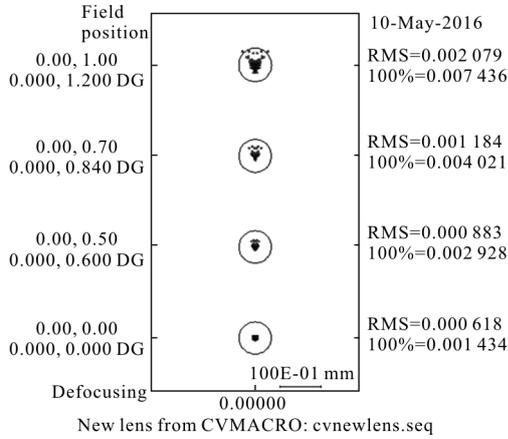


图 3 同轴两反系统遮拦面积

Fig.3 Area of obscuration of coaxial two-mirror optical system

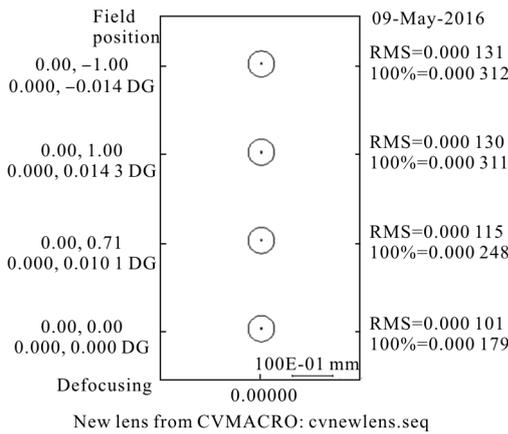
可见光系统的艾里斑直径为 $7.79 \mu\text{m}$,激光成像子系统的艾里斑直径为 $15.58 \mu\text{m}$,从图 4 中可以看出,各视场点列图直径均方根值均小于艾里斑

直径。从图 5 的 *MTF* 曲线可以看出,系统的成像质量接近衍射极限,可见光子系统全视场 *MTF* 均大



(a) 可见光子系统点列图

(a) Spot diagram of optical system for visible subsystem

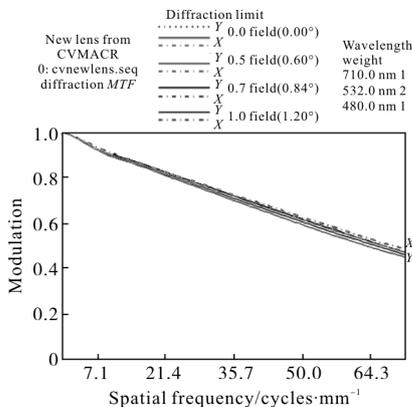


(b) 激光成像子系统点列图

(b) Spot diagram of optical system for laser imaging subsystem

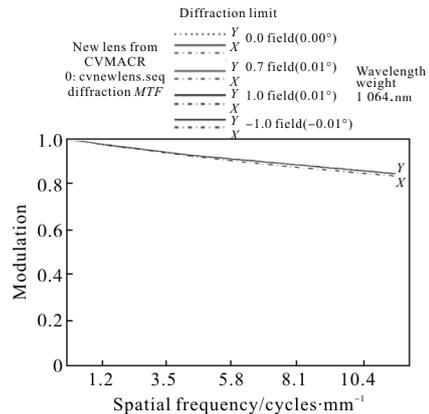
图 4 点列图

Fig.4 Spot diagram



(a) 可见子系统 *MTF* 曲线

(a) Curves of the *MTF* of visible subsystem



(b) 激光光子系统 *MTF* 曲线

(b) Curves of the *MTF* of laser subsystem

图 5 *MTF* 曲线

Fig.5 Curves of the *MTF*

于 0.45,激光成像子系统全视场 *MTF* 均大于 0.83,满足大于 0.408 的设计要求,可以满足系统最终的静态传函优于 0.2 的设计指标要求。

5 公差分析

同轴折反射式系统由于反射镜为旋转对称形式,因此各反射镜具有五个装调公差(即五个自由度):*x* 方向平移、*y* 方向平移、*z* 方向的平移、绕 *x* 轴旋转(α 角)和绕 *y* 轴旋转(β 角)。同时反射镜为非球面镜,因此加工误差主要包括:曲率半径公差(*DLR*)、二次曲面常数误差(*DAK*)和次镜的六次非球面系数公差(*DAB*)。透镜公差主要包括:套样板公差(*DLF*)、曲率半径公差(*DLR*)、厚度增量公差(*DLT*)、透镜表面的 *x*、*y* 轴倾斜(*TRX*、*TRY*)、透镜的桶形倾斜(*BTX*、*BTY*)和透镜的整体偏心误差(*DSX*、*DSY*)。为保证成像系统全视场成像质量,可见光子系统以 71.4 lp/mm 处的 *MTF*、激光成像子系统以 11.6 lp/mm 处的 *MTF* 作为系统评价指标,以各自像面的 *z* 方向移动量作为调整补偿进行系统的公差分析。其中同轴两反射系统的公差如表 3 所示。

以图 1 中保护玻璃的表面为表面 1、2,中继透镜组(4)中第一元件的表面为表面 3,其他依次排列,*MTF* 概率分布曲线如图 6(a)所示,可见光子系统的公差如表 4 所示。其他几路激光光子系统由于孔径较小,且设计 *MTF* 远远大于 0.408,在加工公差与可见光子系统相同的情况下,装调角度公差均在

表 3 同轴两反光学系统公差

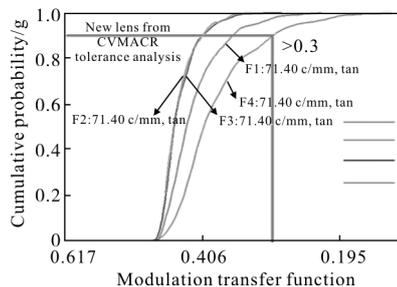
Tab.3 Tolerance of coaxial two-mirror optical system

Type	Item	Primary mirror	Secondary mirror
Assembling	Displacement x/mm	0.02	0.02
	Displacement y/mm	0.02	0.02
	Displacement z/mm	0.02	0.03
	Tilt $\alpha/(\prime)$	12	12
	Tilt $\beta/(\prime)$	12	20
Manufacturing	$\Delta R/mm$	0.5	0.5
	ΔK	0.001	0.005
	ΔB	-	5×10^{-6}

10' 以上,位置公差均在 0.2 mm 以上。因此文中不再给出具体的公差分配结果,只给出在上述条件下激光成像子系统的 MTF 概率分布曲线,如图 6(b)所示。

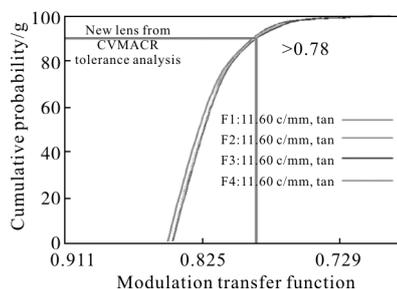
由图 6 可以看出,按照公差分配结果进行加工和装调,大于 90%的可见光子系统的 MTF>0.3,大于 90%的激光成像子系统的 MTF>0.78,满足设计指

标要求。



(a) 可见光子系统 MTF 概率曲线

(a) MTF probability curves of the visible subsystem



(b) 激光成像子系统 MTF 概率曲线

(b) MTF probability curves of the laser imaging subsystem

图 6 MTF 概率曲线图

Fig.6 MTF probability curves

表 4 可见光子系统公差

Tab.4 Tolerance of visible subsystem

Surface	DLF(Fringes)	DLR/mm	DLT/mm	DLA/(\prime)	DLB/(\prime)	BTX/(\prime)	BTY/(\prime)	DSX/mm	DSY/mm
1	5	-	0.2	30	30	100	100	0.03	0.03
2	5	-	0.2	41	41	-	-	-	-
3	5	0.1	0.05	60	60	41	61	0.04	0.04
4	5	-	0.05	20	20	-	-	-	-
5	5	-	0.05	60	60	61	61	0.03	0.03
6	5	0.1	0.05	60	60	-	-	-	-
7	-	-	0.2	80	80	61	206	0.03	0.025
8	-	-	0.2	80	80	-	-	-	-
9	-	-	0.2	80	80	-	-	-	-
10	10	0.1	0.2	80	80	103	103	0.05	0.03
11	10	0.1	0.2	80	80	-	-	-	-
12	10	3	0.2	80	80	103	103	0.05	0.05
13	10	3	0.2	80	80	-	-	-	-
14	10	-	0.2	80	80	619	619	0.05	0.05
15	10	-	0.2	80	80	-	-	-	-

6 结 论

文中设计的多谱段共孔径跟踪引导系统实现了斜程距离为 60km 时,可见光子系统成像范围 2km,分辨率 0.35 m,激光成像子系统分辨率 2 m,同时具有激光测高功能。通过各视场成像质量分析可以看出,可见光子系统的设计传函大于 0.45,激光成像子系统的设计传函大于 0.83,且均接近衍射极限。针对相应的设计结果对系统进行了公差分析,通过对不同表面的公差分配,得到的分析结果表明 90% 的光学系统满足静态传函要求。该系统既可以获得跟踪目标的清晰图像,又可以获得目标的相对位置信息,结构紧凑,有利于系统的旋转跟踪,同时具有较松的加工和装调公差,具有非常高的实用价值。

参考文献:

- [1] Cong Haijia. Complex optical system design for infrared/laser with large field of view and high resolution [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1–10. (in Chinese)
丛海佳. 大视场高分辨率红外/激光复合光学系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1–10.
- [2] Han Bing, Wu Yanxiong, Chen Xiaoping, et al. Structure design of laser/visible dual-mode seeker [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(11): 1382–1387. (in Chinese)
韩冰, 吴雁熊, 陈晓萍, 等. 激光及可见光双模引导头结构设计 [J]. 发光学报, 2014, 35(11): 1382–1387.
- [3] Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 198–204. (in Chinese)
巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(7): 198–204.
- [4] Yu Linyao, Jia Hongguang, Wei Qun, et al. A design of mid-wave infrared integral catadioptric optical system with wide FOV [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(2): 142–147.
- [5] Zhao Wencai. Design of improve off-axial TMA optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1213–1220. (in Chinese)
赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1213–1220.
- [6] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Thermal optical analysis of off-axis three-mirror system and its thermal control requirements [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1213–1220. (in Chinese)
巩盾, 田铁印, 王红. 离轴三反射系统的热光学分析和温控指标的制定 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1213–1220.
- [7] Shu Rong, Xu Zhihai, Fang Jiancheng, et al. Laser Radar Imaging Principle and Motion Error Compensation Method [M]. Beijing: Science Press, 2014: 30–33. (in Chinese)
舒嵘, 徐之海, 房建成, 等. 激光雷达成像原理与运动误差补偿方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 30–33.
- [8] Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0401001. (in Chinese)
姜会林, 付强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0401001.
- [9] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 30–33. (in Chinese)
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 30–33.
- [10] Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 10–37. (in Chinese)
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: 10–37.
- [11] Mei Gui, Zhai Yan, Miao Jianyu, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222004. (in Chinese)
梅贵, 翟岩, 苗建宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222004.
- [12] Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, et al. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 315–318. (in Chinese)
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315–318.