

文章编号 1004-924X(2018)09-2326-07

三维成像载荷共孔径光学系统设计

马 烈^{1,2}, 陈 波^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于激光雷达高程数据与平面影像数据融合的三维成像技术是三维遥感探测技术的重要发展方向之一。本文设计了基于此体制的共孔径三维成像载荷的光学系统。从受限的空间尺寸出发,以此作为设计输入条件,得到光学系统的初始设计参数,设计了焦距为 2 400 mm, F 数为 5.33 的偏视场同轴三反系统。采用三镜前置的方式,大大缩短了光学系统的轴向长度,使光学系统的轴向长度仅为焦距的 $1/4.36$,在有限的空间内,实现了长焦距、高分辨率的光学系统排布。采用偏视场设计,避免了系统内的二次遮挡。整个系统的成像质量良好,无色差,畸变小,光学调制传递函数接近衍射极限,同时其相对孔径较大,有效通光孔径较大,能量集中度高,在保证高地面分辨率的同时,满足了激光接收端对能量的需求。

关键词:三维成像;同轴三反;偏视场;共孔径;三镜前置;光学系统设计

中图分类号:TB853.29 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182609.2326

Optical design of a co-aperture system for 3-D remote sensing payload

MA Lie^{1,2}, CHEN Bo^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: chenb@ciomp.ac.cn*

Abstract: 3-D remote sensing based on the combination of ladar and 2-D remote sensing data is one of the most important emerging trends in the field of remote sensing. We design a co-aperture optical system to be used for 3-D remote sensing payload. In order to use the spatial limitation of the satellite as input conditions, we modify the initial equation of the three-mirror system. The original parameters are determined from the solution of the modified equation and then a coaxial three-mirror system is designed. The fields are biased to avoid secondary obstruction caused by the image plane. The focal length and F number of the system are 2 400 mm and 5.33, respectively. The tertiary mirror is placed in front of the primary mirror to shorten the on-axial length by using three plane mirrors, which resolves the contradiction between long focal length and spatial size. The system is free of chromatic aberration, has small distortion and offers a good performance. The modulation transfer function approaches the diffraction limit, and the system has a large relative aperture, of which the geometric

收稿日期:2018-04-04;修订日期:2018-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1631117)

encircled energy is confined within a circle of diameter 35 μm . The designed optical system provides good performance with high resolution and satisfies the requirements for lidar.

Key words: coaxial three-mirror system; bias field; front tertiary mirror; 3-D remote sensing; optical design

1 引言

立体遥感测量技术是空间遥感技术的重要分支之一^[1],相比与平面遥感技术,它可以获得地面或其他行星表面目标的高程信息,得到探测目标的三维立体数据^[2]。在地面目标识别及地形勘探等领域有着重要应用。

三线阵立体测绘相机在三维遥感测量中被广泛应用^[3],具有体积小、功耗低和重量轻^[4]等优势,德国的“MOMS”系列卫星^[5]、日本的“PTISM”测绘卫星^[6]、我国 2010 年发射的“天绘一号”卫星^[7]以及 2012 年发射的“资源三号”卫星^[8]均采用三线阵相机,实现对地面目标的三维测量。但是其地面分辨率较低,高程精度一般。

基于激光雷达数据与平面影像数据融合的三维成像技术是三维遥感探测的重要发展方向之一,其高程精度高,二维地面分辨率高,通过合适的配准与数据融合,可以快速准确地获得探测目标的三维数据。为实现二维平面影像与激光高程数据的同时获取,共孔径接收光学系统是很好的解决方案。因此,对光学接收系统提出了长焦距、大相对孔径的要求,以满足高地面分辨率、高集光能力的需求。

本文设计了一个共孔径光学成像系统,其焦距长 2 400 mm,相对孔径为 1/5.33。采用偏视场同轴三反射光学系统,光学系统集光能力强,地面分辨率高。为了减小光学系统的体积,采用三镜前置的方案,大大缩短了光学系统的轴向空间尺寸。光学系统无色差,畸变小,能量集中度高,光学调制传递函数接近衍射极限,成像质量良好。

2 光学系统设计输入

光谱范围:450~900 nm,1 064 nm(激光波长);

地面像元分辨率(二维成像): $\leq 1.5 \text{ m}@400 \text{ km}$;

视场角: $\geq 0.3^\circ$ (激光足印与二维图像的匹配结果);

相机静态传递函数(MTF): $\geq 0.2@$ Nyquist frequency;

光学系统外形尺寸: $\leq 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$;

有效通光口径: $\geq 400 \text{ mm}$ (激光对集光能力的要求);

探测器像元大小:8.75 $\mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$;

激光接收端光纤纤芯直径:50 μm 。

3 光学系统初始结构设计

3.1 光学系统原始参数计算

3.1.1 焦距

光学系统焦距 f 与轨道高度 H 、地面像元分辨率 GSD 和探测器像元大小 a 有如下关系^[9]:

$$f = \frac{Ha}{GSD}, \quad (1)$$

其中,根据设计输入, $GSD=1.5 \text{ m}$, $H=400 \text{ km}$, $a=8.75 \mu\text{m}$,代入数据, $f=2\ 333.33 \text{ mm}$,为保证地面分辨率,取 $f=2\ 400 \text{ mm}$ 。

3.1.2 光学系统设计 MTF

探测器的 Nyquist 频率与像元尺寸大小有关:

$$\nu = \frac{1}{2a}, \quad (2)$$

故此系统的 Nyquist 频率为:

$$\nu = 1/(2 \times 8.75 \mu\text{m}) = 57.1 \text{ lp/mm}.$$

相机的静态 MTF 由光学系统和电子学系统共同决定^[9],可由以下公式表示:

$$MTF_{\text{camera}} = MTF_{\text{opt}} \times MTF_{\text{elec}} = MTF_{\text{opt-design}} \times MTF_{\text{process}} \times MTF_{\text{elec}}, \quad (3)$$

其中: MTF_{process} 一般可取 0.8, MTF_{elec} 一般可取 0.49,结合 $MTF_{\text{camera}} \geq 0.2$ 的要求,可得:

$$MTF_{\text{opt-design}} \geq 0.51.$$

3.1.3 光学系统类型选择

透射式系统结构简单,但是二级光谱很难完全消除。全反射光学系统没有色差,引入二次曲面后

可以有效平衡光学系统的像差^[10]。同时,系统要求空间尺寸不大于 600 mm×600 mm×550 mm,故把同轴三反射光学系统作为光学系统的初始结构。另外,由于受到空间尺寸限制,需要考虑光路折叠的方法,折叠次数不大于 3 次。在设计时,要充分考虑次镜对主镜的遮拦,以满足有效通光口径的指标要求。

3.2 同轴三反射光学系统设计

系统焦距长,轴向空间仅为焦距的 1/4.36,给光学设计造成极大的困难。为了得到合理的初始结构,需要从光学系统的空间尺寸出发,通过计算,得到同轴三反系统的初始结构参数。

同轴三反光学系统初始结构如图 1 所示^[11], M_1 、 M_2 、 M_3 为 3 个反射镜, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 3 个反射镜顶点处的曲率半径, M_1 与 M_2 之间的距离为 d_1 , M_2 与 M_3 之间的距离为 d_2 , M_3 到像面的距离为 d_3 。同轴三反系统次镜到主镜的距离较长,需要进行光路折叠。考虑到空间对光学系统的限制,可以采用三镜前置的方案,将光路折叠,缩短同轴三反系统的轴向距离。采用 3 片折转镜,可以估计出 d_1 、 d_2 和 d_3 的大小: $d_1 = -380$ mm, $d_2 = 1 390$ mm, $d_3 = -550$ mm。

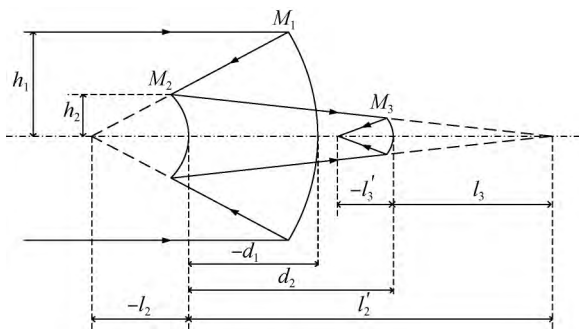


图 1 同轴三反射光学系统的初始结构

Fig.1 Initial structure of coaxial three-mirror system

用 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 来表示三反射系统的结构参数^[12],其中:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u'_2} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \\ \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u'_3} \end{cases} \quad (4)$$

其中: α_1 为次镜对主镜的遮挡; α_2 为三镜对次镜的遮挡; β_1 为次镜的放大倍率; β_2 为三镜的放大

倍率。

考虑到镜面之间的距离与镜面的结构参数之间的关系^[11],并结合三镜系统的平视场条件,对三镜光学系统初始解方程进行修改,可以得到式(5):

$$\begin{cases} \frac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2} - \frac{d_1}{f} = 0 \\ \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} - \frac{d_2}{f} = 0 \\ \alpha_1\alpha_2 - \frac{d_3}{f} = 0 \\ \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1\alpha_2} + \frac{(1+\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

其中 f 为光学系统焦距。

根据镜面间距离的初始设置,可以得到系统的初始参数:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.284 7, \alpha_2 = -0.805 0, \\ \beta_1 &= -5.092 0, \beta_2 = 0.887 2. \end{aligned}$$

此系统为二次成像同轴三反系统,可以通过在一次像面上设置光阑,抑制系统的杂光。

根据得到的遮拦比和放大倍率参数,结合初级像差理论^[13],得到式(6):

$$\begin{aligned} & -\beta_1^3\beta_2^3 \cdot K_1 + \alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)^3 \cdot K_2 - \\ & \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^3 \cdot K_3 - \beta_1^3\beta_2^2 + \alpha_1\beta_2^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 \\ & - \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2 = 0, \\ & \frac{(\alpha_1-1)(1+\beta_1)^3\beta_2^3}{4\beta_1\beta_2} \cdot K_2 - \\ & \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} \cdot K_3 + \\ & \frac{(\alpha_1-1)\beta_2^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \\ & \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} = 0, \\ & \frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1-\beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} \cdot K_2 - \\ & \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)]^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} \cdot K_3 + \\ & \frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \\ & \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)]^2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \\ & \frac{\beta_2(\alpha_1-1)(1+\beta_1)(1-\beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \\ & \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \\ & \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{(1+\beta_2)}{\alpha_1^2} = 0, \quad (6) \end{aligned}$$

其中 K_1, K_2, K_3 分别为 3 个非球面反射镜的二次曲面系数。

求解式(6), 得到初始曲面系数为:

$$K_1 = -1.165\ 0, K_2 = -3.279\ 8, K_3 = 0.468\ 9.$$

三镜系统中, 3 个非球面反射镜的顶点处曲率半径与 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 的关系为:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f \\ R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1+\beta_1)} f \\ R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7), 结合方程(5)的计算结果, 可得到系统 3 个非球面顶点处曲率半径, 分别为:

$$\begin{cases} R_1 = -1\ 062.5\ \text{mm} \\ R_2 = -376.4\ \text{mm} \\ R_3 = -582.9\ \text{mm} \end{cases}$$

至此, 得到三镜系统所有的初始结构参数, 如表 1 所示。

表 1 三镜系统初始结构参数

Tab. 1 Initial parameters of three-mirror system

名称	数值
d_1/mm	-380
d_2/mm	1 390
d_3/mm	-550
K_1	-1.165 0
K_2	-3.279 8
K_3	0.468 9
R_1/mm	-1 062.5
R_2/mm	-376.4
R_3/mm	-582.9

将以上数据作为输入, 考虑到系统视场及波段要求, 通过 Code V 光学设计件, 进行系统初步优化, 得到最终的光学系统初始结构, 如图 2 所示。

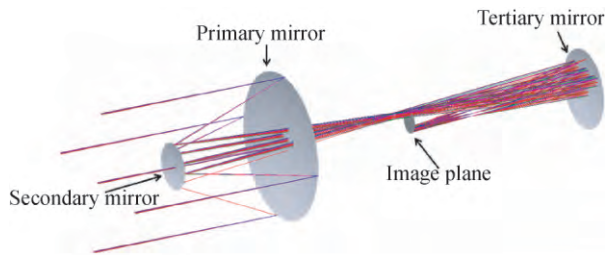


图 2 光学系统初始结构

Fig. 2 Initial configuration of the optical system

优化后的结构数据如表 2 所示。

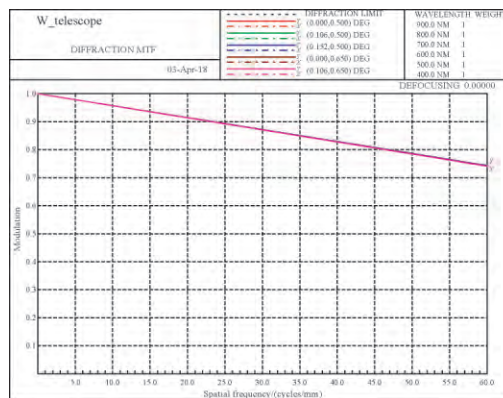
表 2 同轴三反射光学系统初步优化后结构参数

Tab. 2 Parameters of three-mirror optical system after first optimization

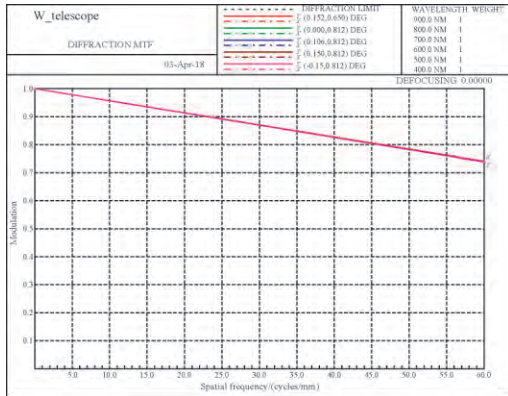
名称	数值
d_1/mm	-380
d_2/mm	1 390
d_3/mm	-600
K_1	-0.912 1
K_2	-1.783 1
K_3	-0.439 1
R_1/mm	-1 072.05
R_2/mm	-394.32
R_3/mm	-620.39

将视场设为偏视场 0.5° , 避免像面对三镜的二次遮挡。经过优化, 3 个镜面的二次曲面系数的绝对值均小于 2, 方便后续加工。

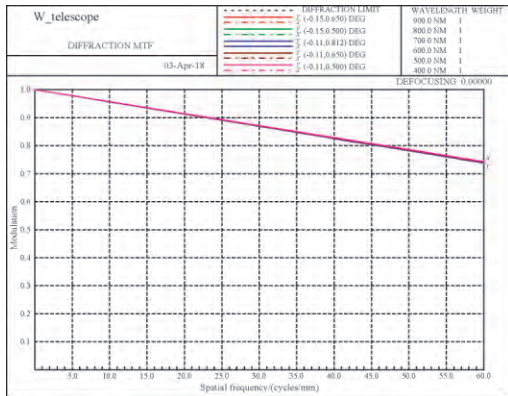
初始结构全视场的调制传递函数(MTF)如图 3 所示:



(a) $(0.000^\circ, 0.500^\circ)$ $(0.106^\circ, 0.500^\circ)$ $(0.150^\circ, 0.500^\circ)$
 $(0.000^\circ, 0.650^\circ)$ $(0.106^\circ, 0.650^\circ)$



(b) (0. 15°, 0. 650°) (0. 000°, 0. 812°) (0. 150°, 0. 812°) (-0. 150°, 0. 812°) (0. 106°, 0. 812 5°)



(c) (-0. 150°, 0. 650°) (-0. 150°, 0. 500°) (-0. 11°, 0. 812°) (-0. 11°, 0. 650°) (-0. 11°, 0. 500°)

图 3 初始同轴三反射光学系统全视场 MTF

Fig. 3 MTF of initial three-mirror optical system in all fields

由图可知,全视场的 MTF 均接近衍射极限,在截止频率处(像元尺寸为 8.75 μm)均大于 0.7,满足指标要求。

全视场的畸变如图 4 所示。

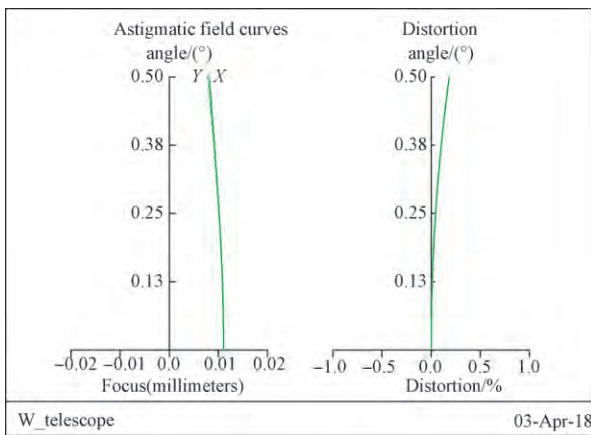


图 4 初始同轴三反射光学系统全视场畸变

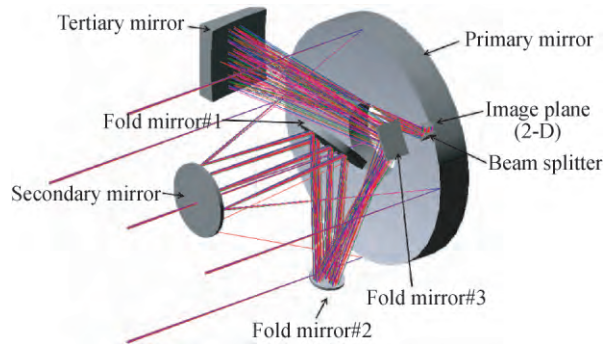
Fig. 4 Disordtion of initial three-mirror optical system in all fields

光学系统为全反射式系统,因此没有色差,系统全视场畸变小于 0.2%,满足成像要求。

主镜直径为 450 mm,次镜直径为 142 mm,故系统的有效通光口径为 427 mm,满足指标要求。

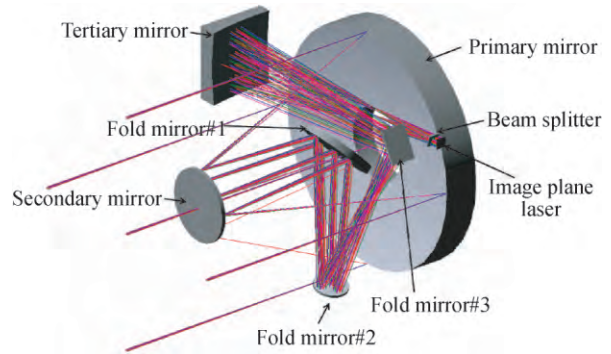
4 系统优化设计

由于整个光学系统的焦距较大,同时 F 数较小,光学系统的排放空间受到极大限制。传统三镜后置的光学系统难以达到设计要求,考虑到主镜支撑等后期机械结构实现,三镜并不适合排布在主镜后,因此通过光路折叠,将三镜前置,不再增加轴向的距离,将整个光学系统的空间尺寸限制在指标范围之内。为实现激光接收与二维成像共孔径光学系统设计,在像面前加入分光镜,令激光接收端处于透射支路,二维成像接收端处于反射支路。经过计算与实际规划,得到如图 5 的结构形式。



(a)二维成像光学系统

(a)2-D image optical system



(b)激光接收光学系统

(b)Laser receiving optical system

图 5 同轴三反射光学系统优化后空间结构排布图

Fig. 5 3-D model of three-mirror optical system after optimization

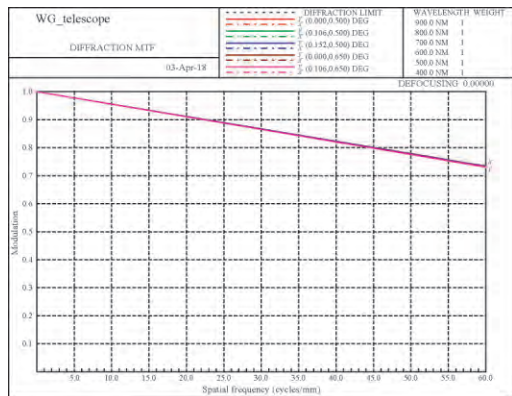
其结构参数如表 3 所示。

表 3 同轴三反射光学系统优化后结构参数
Tab.3 Parameters of optical system three-mirror optical system after optimization

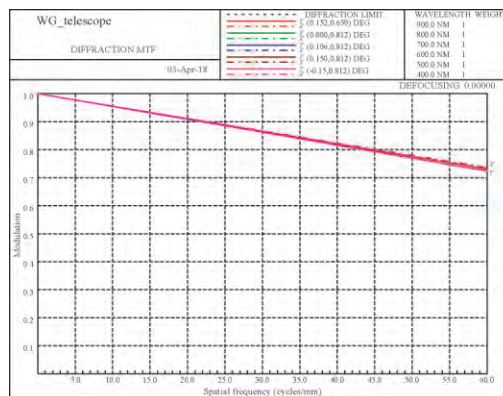
名称	曲率半径/mm	二次系数	到下表面距离/mm
主镜	-1 050.19	-0.894 4	-380
次镜	-353.86	-1.605 4	300
反射镜 1	无限	0	-240
反射镜 2	无限	0	410
反射镜 3	无限	0	-440
三镜	526.76	-0.451 1	460
分色镜前表面	无限	0	-20(二维成像) 5(激光接收)
分色镜后表面	无限	0	16.84(激光接收)
像面	无限	0	—

在次镜后放置 45°反射镜 1,将光路 90°折叠,反射镜 2 将光路偏折 30°,避免反射镜 3 对主镜的遮挡。采用偏视场设计^[14],视场偏 0.5°,使从三镜出射的光束偏离入射光束方向,避免像面对三镜的遮挡,使整个系统无二次遮挡。

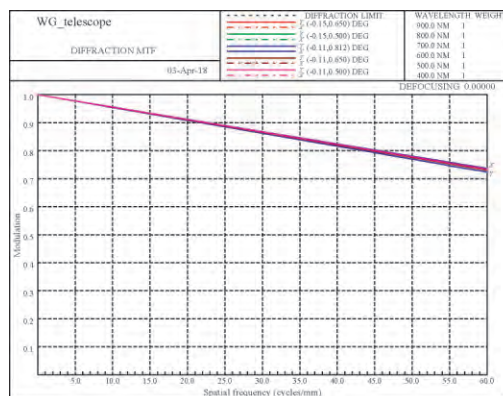
加入折转反射镜组的二维成像光学系统的 MTF 如图 6 所示:



(a) (0.000°, 0.500°) (0.106°, 0.500°) (0.150°, 0.500°)
(0.000°, 0.650°) (0.106°, 0.650°)



(b) (0.150°, 0.650°) (0.000°, 0.812°) (0.150°, 0.812°)
(-0.150°, 0.812°) (0.106°, 0.812 5°)



(c) (-0.150°, 0.650°) (-0.150°, 0.500°) (-0.11°, 0.812°)
(-0.11°, 0.650°) (-0.11°, 0.500°)

图 6 同轴三反射光学系统优化后二维成像光路全视场 MTF
Fig.6 MTF of 2-D image optical system after optimization in all fields

其畸变如图 7:

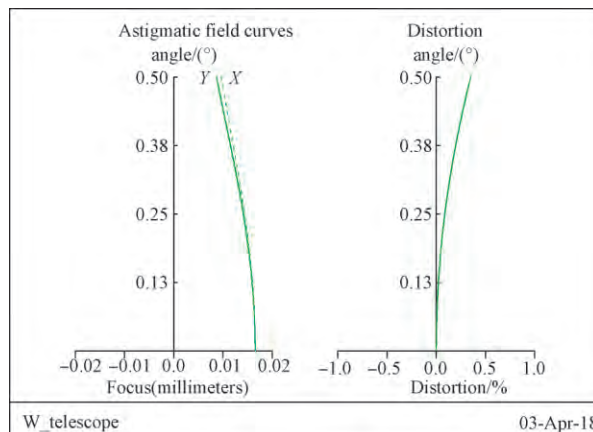


图 7 同轴三反射光学系统优化后二维成像光路全视场畸变
Fig.7 Distortion of 2-D image optical system after optimization in all fields

对比图 3 和图 4,二维成像系统的 MTF 在边缘视场有所下降,但仍然均大于 0.7,逼近衍射极限,满足成像要求,系统的全视场畸变不大于 0.5%,满足成像要求,可见,折转镜组的引入没有对光学系统产生严重影响,光学系统的成像质量依旧良好。激光接收端的能量集中度如图 8 所示。

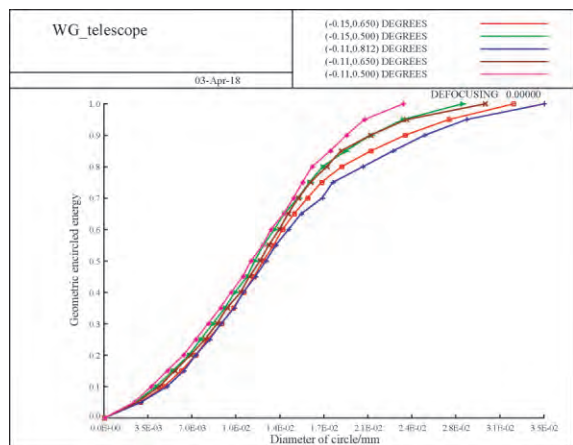


图 8 激光接收端能量集中度

Fig. 8 Geometric encircled energy of laser receiving system

参考文献:

- [1] 夏巧桥,胡正文,张青林. 遥感相机快视高速可靠传输系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 971-979.
XIA Q Q, HU ZH W, ZHANG Q L. Design and implementation of high speed and reliable transmission platform in fast view system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 971-979. (in Chinese)
- [2] 吕世良. 星载三线阵 CCD 立体测绘相机调焦技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004, 10.
LV SH L. *Research on Focusing Technology of Three Line CCD Mapping Camera based on Satellite* [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2004, 10. (in Chinese)
- [3] 杨文波,朱明,刘志明,等. 基于 3 线阵探测器的亚像元成像超分辨率重构[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2247-2258.
YANG W B, ZHU M, LIU ZH M, *et al.*. Super-resolution reconstruction of sub-pixel imaging achieved by

激光接收端对光学系统像面的能量集中度有较高的要求。由图 8 可知,100%的能量集中在直径 35 μm 范围内,小于接收用多模光纤的纤芯直径(50 μm),满足激光接收端对能量的需求。

5 结 论

本文设计了一套共孔径同轴偏视场三反射光学系统,用于基于激光雷达数据与平面影像数据融合的三维成像空间载荷。文章从设计原理出发,首先修改了光学系统初始解方程,使其能以空间尺寸作为输入条件,通过对方程的求解,并通过相关变换,获得了光学系统的初始参数。由于空间尺寸严重限制,为了不再增加光学系统的轴向距离,将三镜前置,大大缩短了光学系统的轴向空间,使其轴向距离仅为焦距的 1/4.36,在 600 mm \times 600 mm \times 550 mm 的空间内,实现了焦距为 2 400 mm 的同轴三反光学系统的空间排布。光学系统的焦距长,分辨率高,无色差,畸变小,成像质量好,同时相对孔径较大,有效孔径较大,能量集中度高,可以满足激光接收端对能量接收的需求。

- three linear array detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2247-2258. (in Chinese)
- [4] 田铁印,王红,谷凤安,等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.
TIAN T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
- [5] BODECHTEL J, HAYDN R, ZILGER J, *et al.*. MOMS-01-Missions and results, In: *Monitoring earth's ocean, land, and atmosphere from space-Sensors, systems, and applications*, AIAA, 1985: 524-535.
- [6] ALBERTZ J, EBNER H, NEUKUM G. The HR-SC/WAOSS Camera Experiment on the Mars96 Mission-A photogrammetric and cartographic view of the project, *International Archives of Photogrammetry and remote sensing*, vol. XXXI, part B4, Vienna, 1996: 58-63.
- [7] 耿弘毅,龚志辉,高超,等. 天绘一号三线阵相机在轨几何参数精化[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 282-290.

- GENG H Y, GONG ZH H, GAO CH, *et al.*. On-orbit geometric parameters refinement of mapping satellite-1 triple line array camera [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45 (3): 282-290. (in Chinese)
- [8] 高卫军, 孙立, 王长杰, 等. “资源三号”高分辨率立体测绘卫星三线阵相机设计与验证[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 25-34.
- GAO W J, SUN L, WANG CH J, *et al.*. Design and verification of three-line array camera for ZY-3 high resolution stereo mapping satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33 (3): 25-34. (in Chinese)
- [9] 王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报. 2015, 35(1): 0122001-1-0122001-9.
- WANG X K. Optical design of a high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*. 2015, 35 (1): 0122001-1-0122001-9. (in Chinese)
- [10] 巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 714-724.
- GONG D. Review on mapping space remote sensor optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)
- [11] 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.
- CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)
- [12] 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(12): 2837-2843.
- ZHAO W C. Design of improved off-axial TMA optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2837-2843. (in Chinese)
- [13] 宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- SONG Y F, SHAO X P, XUN J. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (4): 706-709. (in Chinese)
- [14] 韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002 1-0416002 6.
- WEI X X, XU F, YU J J. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, 39(4): 0416002 1-0416002 6. (in Chinese)

作者简介:



马 烈(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,研究实习员,2013年、2015年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学设计、激光通信方面的研究。E-mail: hitmalie@126.com

导师简介:



陈 波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003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,主要从事软 X 射线-极紫外波段和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn