

文章编号: 1002-2082 (2021) 01-0023-07

主三镜一体化离轴三反光学天线设计

任兰旭, 谭庆贵, 张缓缓, 呼新荣, 李 帅

(中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710000)

摘要: 为提高空间激光通信离轴三反光学天线的装调效率, 需要对反射镜总的装调自由度进行优化设计。基于共轴三反无焦系统的设计原理, 提出一种主三镜一体化的设计方法, 并推导了光学系统结构参数之间的关系, 利用 Zemax 光学软件设计了一种结构紧凑、主三镜一体化的离轴三反光学天线。设计结果表明: 全视场光学像质优于衍射极限, 主镜和三镜空间位置相接近, 可共母板加工和面形共基准检测, 为主三镜的一体化加工提供了方法。光学天线的装调自由度减少了 6 个, 降低了装调难度, 提高了装调效率。

关键词: 空间激光通信; 光学天线; 装调自由度; 主三镜一体化

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0101004](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101004)

Design of off-axis three-mirror optical antenna based on integration of primary-tertiary mirror

REN Lanxu, TAN Qinggui, ZHANG Huanhuan, HU Xinrong, LI Shuai

(Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to improve the installation and adjustment efficiency of off-axis three-mirror optical antenna of space laser communication, it is necessary to optimize the design of total freedom of the mirror. Based on the principle of coaxial three-mirror afocal system, a method of integration of primary-tertiary mirror was proposed. The relationship between structural parameters of optical system was deduced, and an off-axis three-mirror optical antenna with compact structure and primary-tertiary mirror integration was designed by Zemax optical software. The design results show that the optical image quality of full field of view is better than diffraction limit, the primary mirror and tertiary mirror are close to each other in space, the common mother plate can be processed and surface shape can be detected by the common reference, which provides a method for integrated processing of primary mirror and three-mirror. The degree of installation and adjustment freedom of optical antenna is reduced by 6, which reduces the difficulty and improves the efficiency.

Key words: space laser communication; optical antenna; degree of installation and adjustment freedom; integration of primary-tertiary mirror

引言

光学天线作为空间激光通信系统光束发射/接收的核心部件, 其性能指标将直接影响整个激光通信系统的光学性能^[1-3]。目前, 国内外光学天线大多采用卡塞-格林两镜作为物镜配合透射式目镜组使用^[4-6], 可避免装调过程中反复寻找基准, 但次镜遮拦造成能量损失、光学收发隔离度低、色像差、轴外像质差等问题。离轴三反式结构^[7]可有

效消除轴外像差、色差, 提高系统的光学收发隔离度, 又能在较大视场范围内得到良好的成像质量, 但各反射镜独立加工, 不可避免引入相对位置误差。在光学装调过程中, 将主镜固定到镜筒上并以主镜为基准, 依次调节次镜、三镜的平移和倾斜, 装调自由度共 12 个。由于装调基准与光学加工基准不同, 基准误差的传递会造成装调难度大, 装调周期长, 因此降低离轴三反射光学系统的装

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2020-08-03

基金项目: 装备预研航天科技联合基金 (6141B06301)

作者简介: 任兰旭 (1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事空间激光通信光机技术研究. E-mail: ren_lanxu@126.com

调难度很有必要。

2010 年, 亚利桑那大学的 Tuell, Michael T 等人^[8]设计了三反式大口径巡天望远镜(LSST), 并完成了反射镜加工, 主镜和三镜为一个基板上的 2 个同心非球面反射镜, 在加工过程中控制主三镜光学轴的倾斜和同心参数以保证基准精度, 并采用二元光学计算机全息图(CGH)完成了面形检测。2015 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所高铎瑞等人^[9]设计了一种易于加工、装调的离轴三反光学系统, 将主三镜改进为一块非球面反射镜, 焦距为 1 000 mm, F 数为 10, $2^\circ \times 0.4^\circ$ 视场内像质良好, 降低了光学加工的复杂度, 减少了装调难度。2015 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所孟庆宇等人^[10]设计了主三镜可集成一体化的大视场离轴三反光学系统, 焦距为 1 200 mm, F 数为 12, $10^\circ \times 1^\circ$ 视场内最大波像差 RMS 优于 $\lambda/22$, 装调自由度降低了 6 个。同年同单位的沙巍等人^[11]针对离轴三反光学系统主镜和三镜轴向位置接近的特点, 提出了主三镜共基准一体化结构, 对加工后的主三镜组进行面形测试, 主镜面形优于 0.024λ , 三镜面形优于 0.013λ , 能提高光机结构的精度和稳定性。同单位的王孝坤等人^[12]2018 年提出了非球面光学系统共基准加工与检测方法, 对主镜和三镜进行共基准装调和测试, 在背板一体化镶嵌后利用离子束进行一体化共基准加工, 并成功加工了主三镜一体化的光学组件。

采用主三镜一体化的离轴三反光学天线可有效减少光学装调的自由度, 大大降低装调难度。基于共轴三反无焦光学系统的设计方法, 通过控制光学系统的结构参数关系可实现主镜和三镜轴向位置接近, 并采用有限间隔的自由曲面表示主三镜面形, 利用共母板加工和共基准检测。结合初级像差理论计算了光学系统的初始结构, 利用 Zemax 光学软件设计了一种小视场、高像质、结构紧凑的主三镜一体化离轴三反光学天线。

1 理论推导

三反式光学天线系统采用开普勒型结构, 它由传统卡-塞格林两镜系统作为前组物镜, 一块反射镜作为后组目镜, 物镜和目镜共焦点放置形成缩束/扩束系统。离轴三反光学天线基于共轴三反系统原理, 对各光学元件采用偏口径使用, 可避免次镜光学元件对光路的遮挡, 提高系统的光学效率, 共轴三反无焦系统工作原理如图 1 所示。

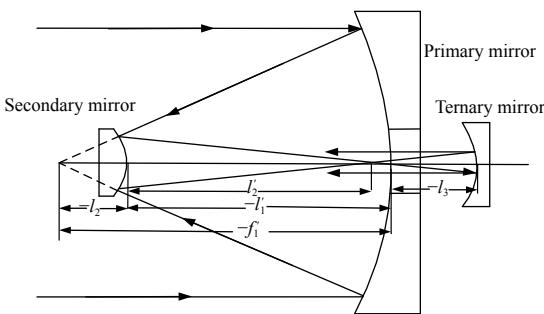


图 1 共轴三反无焦系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of coaxial three-mirror afocal system

根据图 1 的结构关系, 定义次镜遮拦比 $\alpha_1 = l_2/f_1$, 三镜遮拦比 $\alpha_2 = l_3/l_2$, 次镜放大率 $\beta_1 = l_2/l_1$, 三镜放大率 $\beta_2 = l_3/l_1$, 主次镜间距为 d_1 , 次三镜间距为 d_2 , 主镜二次项系数为 e_1^2 , 次镜二次项系数为 e_2^2 , 三镜二次项系数为 e_3^2 。从定义可知 α_1 、 α_2 和 β_1 均小于 0, 无焦三反系统是有焦三反系统的特例, 可采用有焦三反系统像差理论计算, 再对像差计算公式进行简化处理。假设入瞳位于主镜, 由三反光学系统初级像差理论^[13]可知:

$$\begin{aligned} S_I &= \frac{1}{4}(e_1^2 - 1)\beta_1^3 - \frac{1}{4}e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 + \frac{1}{4}e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3 + \\ &\quad \frac{1}{4}\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \frac{1}{4}\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 \quad (1) \\ S_{II} &= -\frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2} + \\ &\quad e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3}{4\beta_1\beta_2} + \\ &\quad \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \\ &\quad \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (2) \\ S_{III} &= -e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} + \\ &\quad e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} + \\ &\quad \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} + \\ &\quad \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \\ &\quad \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} + \\ &\quad \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} + \\ &\quad \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (3) \end{aligned}$$

$$S_{IV} = \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (4)$$

式中: S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 和 S_{IV} 分别为球差、彗差、像散和场曲系数。由于激光通信光学系统视场小, 光学系统的主要像差为球差、彗差, 则 $S_I = 0$, $S_{II} = 0$ 。对于无焦系统, 无穷远物点经过光学系统成像到无穷远处, 主镜物距 $-l_1$ 和三镜像距 l_3' 均趋于无穷大, 对应的孔径角 $u_3' \rightarrow 0$, 即 $\beta_2 = l_3'/l_3 \rightarrow \infty$, 则公式(1)和(2)可简化为

$$\begin{aligned} e_1^2 &= 1 + \frac{1}{\beta_1^3} [\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_1(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 + \\ &\quad e_2^2 \alpha_1(1+\beta_1)^3 - e_3^2 \alpha_1 \alpha_2] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} e_2^2 (\alpha_1 - 1)(1+\beta_1)^3 - e_3^2 [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] &= \\ (\alpha_1 - 1)(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 - [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$L = \frac{\{(1+\alpha_1)(1+\beta_1) + \alpha_1 \beta_1\}(1-\alpha_2)\alpha_1 \beta_1 - (1+\alpha_1)\alpha_1 \beta_1\} \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 f_1'}{\{(1+\alpha_1)(1+\beta_1) + \alpha_1 \beta_1\} \alpha_1 \beta_1 - (1+\alpha_1)\alpha_1 \beta_1} \quad (12)$$

至此, 已全部确定光学系统参数 d_1 、 d_2 、 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^2 、 Γ 、 L 之间的相对关系, 其中自变量为结构参数 f_1' 、 L 、 Γ 、 d_1 和 d_2 。若主镜和三镜与次镜的轴向距离相等, 则 $d_1 = d_2$, 将(7)式和(8)式联立可得

$$(1+\alpha_1) = (1-\alpha_2)\alpha_1 \beta_1 \quad (13)$$

由于主镜、三镜与次镜距离相同且放大倍率不为1, 则 f_1' 和 f_3' 不相同, 虽然主镜、三镜的焦距不同, 但是两镜的有效通光区域径向分布相距不大, 也可以在共基板上分区加工。将(9)式带入(13)式中, 则次镜遮拦 α_1 与次镜放大率 β_1 、放大倍率 Γ 的关系为

$$1 + \alpha_1 - \alpha_1 \beta_1 - \beta_1 / \Gamma = 0 \quad (14)$$

从(14)式可知, 当光学系统的放大倍率 Γ 确定了, 则有一系列($\alpha_1 \beta_1$)解, 满足光学系统要求。

2 设计实例

2.1 技术指标要求

空间激光通信光学天线是一种精密光学系统, 可完成对光束的发射或接收, 为匹配后端中继光学系统常采用高倍率、高光学效率、无焦的光学系统^[14]。根据空间激光通信链路距离确定光学口径为150 mm; 为实现2个相对高速运动的激光通信终端间的瞄准、捕获及有效跟踪, 结合卫星平台不确定区域^[15], 选择视场角大小为2 mrad;

从(5)式和(6)式可知反射镜二次项系数与 α_1 、 α_2 、 β_1 关系。根据各参数定义与光学结构 d_1 、 d_2 和 f_1' 的关系可知:

$$d_1 = (1+\alpha_1)f_1' \quad (7)$$

$$d_2 = l_2' - l_3 = (1-\alpha_2)\alpha_1 \beta_1 f_1' \quad (8)$$

$$\Gamma = \frac{f_o'}{f_e'} = -\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (9)$$

将计算的 α_1 、 α_2 、 β_1 带入初级像差公式(5)和(6)可确定主、次镜和三镜的二次项系数。根据几何光学物像关系 $1/l' - 1/l = 1/f$ 可计算出瞳距离三镜位置 L , 次镜焦距 f_2' 和三镜焦距 f_3' 与主镜顶点焦距 f_1' 关系:

$$f_2' = \frac{\alpha_1 \beta_1}{1+\beta_1} f_1' \quad (10)$$

$$f_3' = \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 f_1' \quad (11)$$

由于通信距离远、接收能量微弱, 对光学系统的光学质量要求很高, 要求通信波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, 光学隔离度优于-50 dB, 全视场的RMS波前误差均优于 $\lambda/15$; 出瞳与机械安装面距离为100 mm, 匹配后端中继光学系统。光学系统的详细指标要求如表1所示。

表1 光学系统设计参数要求

Table 1 Parameters of optical system design

Parameter	Value
Work spectrum/ μm	1.55
FOV/mrad	≥ 2
Entrance pupil diameter D/mm	≥ 150
Compression ratio	-15°
Wave aberration RMS	$\leq \lambda/15$
Optical isolation/dB	≤ -50
Total length/mm	≤ 350

2.2 初始结构设计

使用同轴三反系统偏孔径, 形成了偏瞳式离轴三反系统, 初始结构可用同轴系统进行求解。首先选择主镜焦距和二次项系数, 然后根据系统放大倍率、出瞳距确定间隔和焦距, 再根据球差和彗差确定二镜、三镜系数, 最后确定主镜的离轴量。具体设计方法为: 考虑大口径反射镜的加工难度与相对口径的立方成正比关系^[16], 结合光学系统结

构紧凑、小型化和轻量化要求,选取主镜焦距 f_1' 为300 mm, $e_1^2=1$;出瞳距离机械安装面100 mm,考虑折轴镜与三镜距离约250 mm和镜筒直径约250 mm,出瞳位置与三镜距离 L_3' 约600 mm,将(9)式、(14)式代入(12)式可计算出 L 与 α_1 的关系,如图2所示。

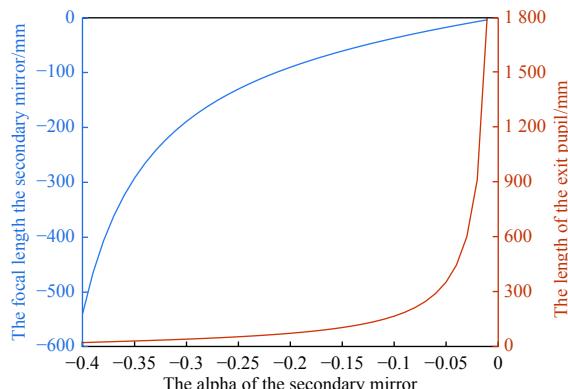


图2 次镜遮拦比 α_1 与次镜焦距 f_2' 、出瞳距 L 的关系

Fig. 2 Relationship between α_1 and f_2' , L

从图2可知, α_1 越大, L 越小, f_2' 越小, 可计算 $\alpha_1 = -0.03$, $\beta_1 = -10.0345$, 出瞳距 $L_3' = 600.8$ mm。将 $\alpha_1 = -0.03$ 带入放大倍率公式(9)可计算 $\alpha_2 = -2.222$ 。将 α_1 、 β_1 、 α_2 和 f_1' 带入镜间距公式(7)和焦距公式(10)和(11), 可计算 $d_1 = d_2 = 291$ mm, 则主镜、三镜与次镜的距离相同, $f_2' = -9.9962$ mm和 $f_3' = -200.6897$ mm。将 α_1 、 β_1 和 α_2 代入球差公式(5)和彗差公式(6)可计算 $e_2^2 = 1.49$, $e_3^2 = 0.88$ 。则入射主光线偏离主镜母轴量 $h = 110$ mm, 入射光束不被遮挡, 并保证了次镜有足够的安装空间。同时根据光线传播定理可知, 中心光线与主镜交点的径向坐标为110 mm, 光斑大小为150 mm, 中心光线与三镜交点的径向坐标为 $-\alpha_1(h + D/2)f_3'/(d_1 - f_3') = 12.2$ mm, 光斑大小为10 mm, 主镜和三镜空间位置接近, 保证了主三镜一体化加工的可行性。至此, 光学天线的初始结构 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^2 、 d_1 和 d_2 全部确定。

2.3 设计结果

将计算的三反光学系统初始结构代入Zemax光学设计软件中, 可通过增加优化变量减小非对称像差。对次镜进行少量的倾斜、平移和二次项系数优化, 优化三镜的二次项系数可补偿前组系统的剩余像差, 沿径向平移三镜就可保证折轴镜的安装位置, 主镜和三镜母轴平行可降低主三镜一体化光学加工难度。出瞳位置在三镜的后方,

通过调节折轴镜位置和姿态可控制出射光束的方向, 优化后的光学天线结构参数如表2所示。

表2 优化后的光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of optical system after optimization

Element	Radius of curvature/mm	Thickness/mm	Conic type
STO	—	400	—
Primary mirror	-600	-290.9	-1
Secondary mirror	-20.225	290.816	-1.499
Ternary mirror	-399.738	-250	-3.777
Fold mirror	Infinity	341	—

优化后的结果与初始结构相近, 近轴角放大率 I 为-15, 入瞳口径为150 mm, 系统总长小于330 mm, 出瞳与机械安装面距离约为100 mm, 三镜的二次项系数变化较大, 主要用于优化视场像差。主次镜间距与次三镜间距相差0.084 mm, 主镜和三镜所处空间位置基本接近, 主镜、三镜面形可为共基板上不同区域的面形且焦距不同, 用连续函数表示不连续的非球面误差较大, 可采用有限间隔的自由曲面表示^[16], 即采用分区域的方式表示曲面形状:

$$z = \begin{cases} \frac{c_1(x^2+y^2)}{c_3(x^2+(y-y_0)^2)} \\ \frac{c_3(x^2+(y-y_0)^2)}{1+\sqrt{1-(1+k_3)(x^2+(y-y_0)^2)}}+z_0 \end{cases} \quad (15)$$

(15)式中上、下式分别为主镜、三镜的面形表达式, 其中主镜中心曲率 c_1 为-0.00166 mm⁻¹、三镜的曲率半径 c_3 为-0.0025 mm⁻¹, 三镜二次项系数 k_3 为-3.777, 主镜和三镜母镜顶点在 y 方向的偏差 y_0 为10 mm, z 方向的偏差 z_0 为0.084 mm。采用主镜和三镜一体化结构设计示意图如图3所示。

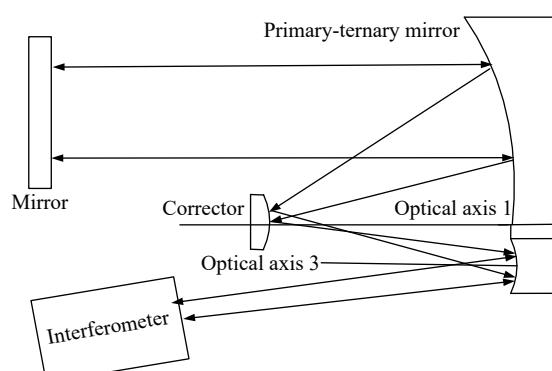


图3 主三镜一体化面形检测光路示意图

Fig. 3 Schematic of surface test optical path of primary-ternary mirror integration

在加工制造过程中^[12],选择主镜与三镜共基板材料,根据主镜和三镜顶点位置关系,首先采用数控铣磨机在主镜区域加工出最佳球面,在三镜区域加工最佳球面,然后用数控抛光机等设备对其进行粗抛光,利用数控离子束抛光机进行主、三镜一体化抛光,最后对共基板反射镜进行轻量化加工,实现主镜与三镜一体化的加工。

在光学加工过程中,需要多次对一体化的面形进行检测,主镜的面形检测可采用无像差点检验,干涉仪的出射光束焦点与抛物面式主镜的焦点重合,光束经过自准形成干涉条纹可检测其面形。三镜的面形检测包括主镜和三镜相对位置及三镜加工面形误差,如图3所示。在主镜面形检测光路基础上,使用次镜作为补偿器,避免了计算全息图测试方法(CGH)制作复杂的补偿器^[17],调节补偿器的位置和姿态,直到干涉条纹最优,从而完成三镜面形检测。实际装调过程中补偿器相对理论位置的姿态精度会影响主三镜的面形测试精度,而补偿器的姿态误差包括位置精度和倾斜精度,假设位置精度为0.01 mm,倾斜误差为10",基于蒙特卡洛算法,采用Zemax光学设计软件模拟计算多组次镜位置偏差引起的测试面形变化。结果显示,测试系统的面形优于0.019λ的概率为90%,可认为重复测试精度为0.019λ。经多次加工、检测共基板分区面形,直到满足要求为止,最终的主三镜一体化光学天线光路如图4所示。

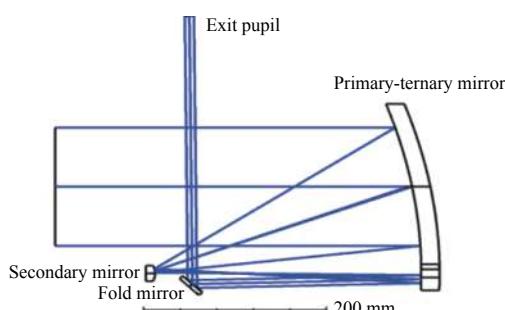


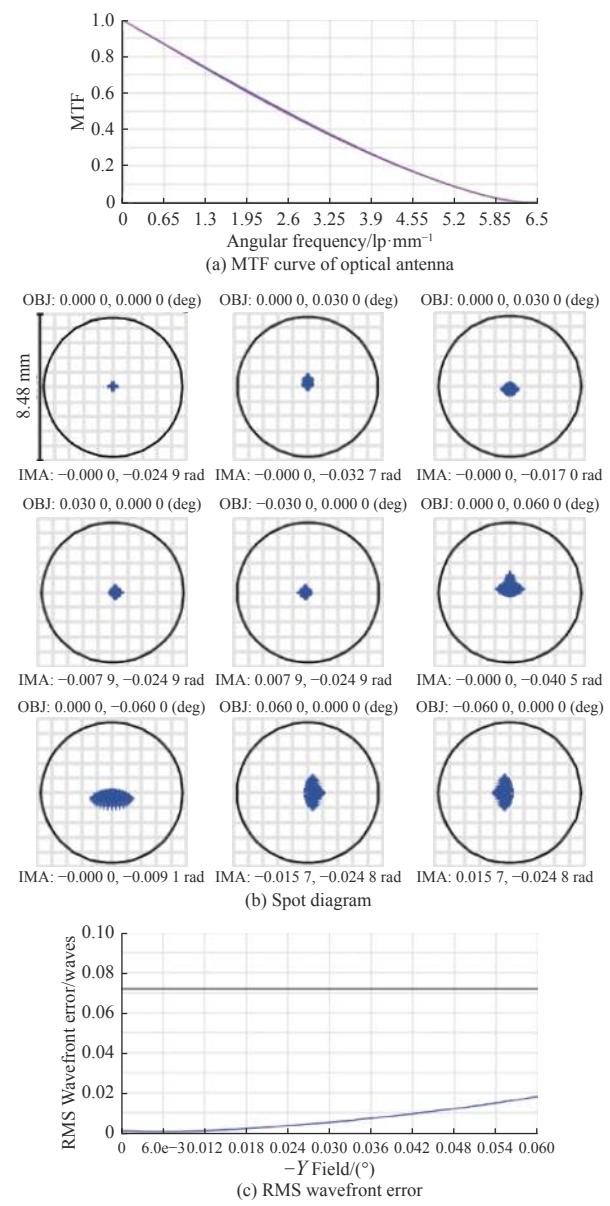
图4 离轴三反光学天线光路图

Fig. 4 Optical path diagram of off-axis three-mirror optical antenna

光学系统的性能作为系统核心指标,通常以点列图(SPOT)、调制传递函数(MTF)和波前误差(WFE)等作为评价指标。MTF反映了光学系统对入射光束不同频率成分的传递能力,RMS波前误差反映的是系统波前的变化,SPOT反应了经过光学系统后成像各点的密集程度,光学收发隔离度

反应了光学系统对后继光路发射激光光束的后向散射杂光的抑制能力,基于双向分布散射函数BSDF采用ABg散射模型表示,选用一组典型值^[18] $A=2.47\times10^{-8}$, $B=4.92\times10^{-7}$, $g=4.29$,利用Tracepro光学软件进行仿真分析,仿真结果如图5所示。

从图5(a)可知,调制传递函数MTF的曲线下降缓慢,各视场均接近衍射极限。从图5(b)可知,各视场几何弥散斑均在衍射极限以内,但-y方向的像质相对较差,这是由于离轴光学系统的非对称性引起的。从图5(c)可知,离轴天线系统在最大半视场1 mrad时,波像差RMS值为0.021λ,也远小于衍射极限。从图5(d)可知,离轴天线系统在全视场2 mrad,隔离度约-51 dB,设计结果满足光学系统指标要求。



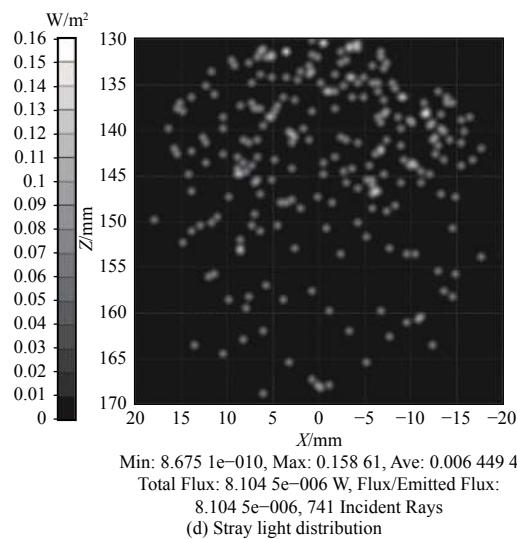


图 5 离轴三反光学天线像质评价图

Fig. 5 Image quality evaluation diagram of off-axis three-mirror optical antenna

2.4 公差分析

主三镜一体化反射镜和次镜在光学加工过程中存在曲率半径、二次项系数、三镜相对主镜的平移和倾斜等加工误差。在光学系统装调过程中将主镜安装到镜筒结构上并作为系统基准,仅调节次镜的 x 、 y 、 z 方向的偏心和 x 、 y 、 z 方向的倾斜,共 6 个装调自由度,折轴镜为平面镜,对系统波像差无影响,表 3 为公差分配结果,表 4 为光学系统的蒙特-卡洛分析结果。

表 3 光学天线的系统公差

Table 3 System tolerance of optical antenna

Tolerance	Primary mirror	Secondary mirror	Ternary mirror	Fold mirror
Wavefront tolerances/ λ	0.02	0.02	0.02	—
Decentered tolerances/mm	0.01	—	0.01	—
Thickness tolerances/mm	0.01	—	0.01	—
Tilt tolerances/($''$)	10	—	60	—
Radius tolerance/mm	0.06	0.01	0.1	—
Conical coefficient tolerance	0.001	0.001	0.001	—

表 4 蒙特-卡洛分析结果

Table 4 Monte-Carlo analysis results

Monte-Carlo probability/%	0 mrad	0.7 mrad	1 mrad
90	0.035	0.038	0.040
80	0.027	0.030	0.030
50	0.015	0.018	0.019

从表 3 可知,光学系统的加工公差很严,尤其是主镜的曲率半径误差较大,主要因为系统角放大倍率高、结构过于紧凑,这也是紧凑形三反光学天线共性问题。从表 4 可以看出,按照系统公差分配进行了 200 次蒙特-卡洛分析模拟,光学天线在 2 mrad 全视场内波像差的 RMS 值优于 0.040λ 的概率为 90%,设计结果满足光学系统指标要求。

3 结论

减少离轴三反光学系统的装调自由度可有效降低装调难度,进而提高光学装调效率。提出了一种以传统卡塞-格林两镜系统偏口径为物镜,以单块反射镜为目镜,主三镜一体化的无焦三反光学系统的设计方法,给出了主三镜一体化光学系统的结构参数关系。以光瞳直径为 150 mm,视场角为 2 mrad,波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 波段和角放大倍率为-15 倍等参数为例进行了光学系统设计、验证。设计结果表明:光学结构紧凑,总长小于 330 mm,光学性能优良,系统像质高,调制传递函数 MTF 接近衍射极限,全视场最大波像差 RMS 值为 0.021λ ,主镜、三镜空间位置接近,通过共基板加工和共基准检测方法,为实现主三镜的一体化加工提供了依据。这种主三镜一体化的三反结构形式可使光学系统装调自由度由 12 个减少到 6 个,大大提高了光学装调效率。

参考文献:

- [1] ROBERTS W T. Discovery deep space optical communication (DSOC) transceiver[J]. SPIE, 2017, 10096: VNP-SP100960V.
- [2] BISWAS A, KOVALIK J, WRIGHT M W. LLCD operations using the Optical Communications Telescope Laboratory (OCTL)[J]. SPIE, 2014, 8971: 89710X.
- [3] YAN Peipei, DENG Xiaoguo, ZHANG Henjin. Optical design of a new type space laser communication optical system[J]. SPIE, 2013, 8906: 890602.
- [4] YANG Chenglong, YAN Changxiang, YANG Yufei. Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 462-468.
杨成龙, 颜昌翔, 杨宇飞. 星间激光通信终端光学天线的隔离度[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 462-468.
- [5] GUAN Shu, WANG Chao, TONG Shoufeng, et al. Optic-

- al antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1222003-1-8.
- 关姝, 王超, 佟首峰, 等. 空间激光通信离轴两镜反射光学天线自由曲面光学天线设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1222003-1-8.
- [6] HAN Peixian, REN Ge, LIU Yong, et al. Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 435-440.
- 韩培仙, 任戈, 刘永, 等. 可见/中波双波段共口径光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 435-440.
- [7] JIN Guan, LI Yanjie, ZHONG Xin, et al. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074.
- 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]. 光学与精密工程, 2014, 22(8): 2067-2074.
- [8] TUELL M T, MARTINA H M, BURGEA J H, et al. Optical testing of the LSST combined primary/tertiary mirror[J]. *SPIE*, 2010, 7739: 77392V-10.
- [9] GAO Duorui, HU Hui, WANG Wei, et al. Optical design for a kind of simply processed and installed off-axis three-reflection[J]. *Chinese Journal of lasers*, 2015, 42(6): 2067-2074.
- 高铎瑞, 胡辉, 汪伟, 等. 一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 2067-2074.
- [10] MENG Qingyu, WANG Wei, JI Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 578-582.
- 孟庆宇, 王维, 纪振华, 等. 主三一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 578-582.
- [11] SHA Wei, CHEN Changzheng, XU Yanjun, et al. Integrated primary and tertiary mirror components from common base line of off-axis TMA space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 26(6): 1612-1619.
- 沙巍, 陈长征, 许艳军, 等. 离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J]. 光学与精密工程, 2015, 26(6): 1612-1619.
- [12] WANG Xiaokun, XUE Donglin, ZHANG Xuejun. Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 743-748.
- 王孝坤, 薛栋林, 张学军. 大口径非球面系统的共基准加工与检验[J]. 光学与精密工程, 2018, 26(4): 743-748.
- [13] PAN Junbi. *Optics non-spherical surface design, processing and detection*[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 130-135.
- [14] SUN Quanshe, ZHAO Facai, CHEN Kunfeng, et al. Design of off-axis optical antenna for space optical communications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2501-2505.
- 孙权社, 赵发财, 陈坤峰, 等. 空间激光通信系统离轴天线设计研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2501-2505.
- [15] HU Zhen, JIANG Huilin, TONG Shoufeng, et al. Research on ATP system technology of laser communication terminal in space[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(6): 752-757.
- 胡贞, 姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信终端ATP技术与系统研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 752-757.
- [16] YE Jingfei. *Research on the method and technique for characterizing freeform optical surface*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- 叶井飞. 光学自由曲面的表征方法与技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [17] LI Fazhi, ZHENG Ligong, YAN Feng, et al. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1052-1056.
- 黎发志, 郑立功, 闫锋, 等. 自由曲面的CGH光学检测方法与实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1052-1056.
- [18] ZHAO Meng, YAN Changxiang, WU Congjun. Simulation analysis of isolation between laser communication ground test equipments[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 472-481.
- 赵猛, 颜昌翔, 吴从均. 激光通信地面测试终端间隔离度的仿真分析[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 472-481.