

长出瞳距离轴四反光学天线的设计研究

田棋杰*, 张建华, 张缓缓, 宋延松, 薛婧婧, 呼新荣, 陈祥, 李帅

中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100

摘要 传统离轴反射光学天线的出瞳距较短,需要中继光学系统将出瞳成像于快反镜附近,这会增加后续光路和结构的复杂度,且中继光学系统的后向散射光会对激光通信终端产生严重的影响。针对上述缺陷,设计了长出瞳距离轴四反光学天线,该光学天线的出瞳被直接设计在快反镜上,省去了中继光学系统。首先,从同轴三反像差理论出发,推导了像差表达式和初始结构方程。然后,基于像差理论和出瞳位置要求,计算了离轴四反光学天线的初始结构参数,并采用 Zemax 软件对初始结构进行光线追迹和性能优化。最后采用 Zemax 对离轴四反光学天线进行了公差分析。结果表明:所提系统性能优异,结构紧凑,加工和装调公差合理,满足激光通信终端性能要求。

关键词 光学设计; 空间激光通信; 离轴光学天线; 出瞳

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1822001

Design of Off-Axis Four-Mirror Optical Antenna with Long Exit Pupil Distance

Tian Qijie*, Zhang Jianhua, Zhang Huanhuan, Song Yansong, Xue Jingjing,
Hu Xinrong, Chen Xiang, Li Shuai

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China

Abstract Traditional off-axis reflecting optical antennas have the disadvantage of short exit pupil distance, leading to the fact that a relay optics is required to re-image the exit pupil on the fast steering mirror and thus the following optical paths and structures are complicate. Moreover, the backward scattering light in the relay optical system has a severe influence on the laser communication terminals. To overcome the above defects, we design an off-axis four-mirror optical antenna, in which the exit pupil of optical antenna is directly designed on the fast steering mirror and thus the relay optical system can be removed. First, the aberration formulas and the initial structural equation are deduced based on the theory of coaxial three-mirror aberration. Then, the initial structural parameters of the off-axis four-mirror optical antenna are calculated according to the aberration theory and the requirement of the exit pupil position. In addition, the ray tracing and the performance optimization of the initial structure are implemented using the Zemax software. Finally, the tolerance analysis of the off-axis four-mirror optical antenna is conducted. The results illustrate that the designed system has the advantages of excellent performance, compact structure, and reasonable manufacture and alignment tolerance. The performance of the designed system can meet the requirements of laser communication terminals.

Key words optical design; space laser communication; off-axis optical antenna; exit pupil

OCIS codes 220.2740; 060.2605

1 引 言

在信息技术不断发展的今天,数据传输对速率、保密性和抗干扰能力的要求越来越高,传统通信方式难以满足要求^[1-3]。空间激光通信作为新一代通信技术,采用指向性好、波长短的激光作为

信息载体,具有通信速率高、保密性好、抗干扰能力强等优点^[4-5]。相比于传统通信系统,在相同体积和功耗下,激光通信系统可以实现更高的通信速率、更好的保密性和更强的抗干扰能力。正是基于上述优点,激光通信技术早已是国内外的研究热点^[6-8]。

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-05-11; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 装备预研航天科技联合基金(614B06301)

* E-mail: tian7jie@163.com

光学天线是激光通信系统的重要组成部分,是承担光束发射、任务接收的核心部件,其性能直接影响整个激光通信系统的通信性能^[9]。目前,光学天线主要分为透射式和反射式结构。透射式光学天线具有成本低、易于制造等优点,但是存在大口径透射光学元件难以制备、需要校正色差等缺点。与透射式光学天线相比,反射式光学天线具有无色差、体积小、光学元件易于实现大口径制备等优点,已经成为光学天线的主流。反射式光学天线又可分为同轴反射式结构和离轴反射结构两类。

同轴光学天线由于存在中心遮拦问题,因此光能利用率低,接收和发射相同能量需要较大的口径。另外,同轴天线的后向散射效应严重,对激光通信系统中的捕获、跟踪和通信等产生极大影响^[10]。因此,为实现高效的光能发射和接收,无遮拦的离轴光学天线备受关注^[11]。随着光学加工和装调技术的不断进步,各种性能优异的离轴光学天线相继问世。

2001年, Fischer等^[12]采用离轴四反结构,设计了 OPTEL-25 激光通信终端的光学天线,系统口径为 135 mm,放大倍率为 10,视场角为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。该光学天线的主次四镜为离轴抛物镜,三镜为平面镜,可用于折转光路。2013年,俞建杰等^[13]设计了离轴三反光学天线,系统口径为 100 mm,视场角为 $1^\circ \times 1^\circ$,全视场(FOV)均方根(RMS)波前优于 $1/20 @ 830 \text{ nm}$ 。研究者在相同输入参数情况下,对同轴两反和离轴三反系统进行了对比,发现离轴三反在多方面具有优势,且具有极高的发射和接收效率^[13]。2015年,赵意意^[14]基于 OPTEL-25 离轴四反光学结构,设计了视场角为 $\pm 7 \text{ mrad}$,放大倍率为 15 的离轴四反光学天线,全视场内像质达到衍射极限。同年,孙权社等^[15]设计了离轴四反光学天线,该系统口径为 150 mm,放大倍率为 15,视场角为 $1^\circ \times 1^\circ$,满足 $0.85, 1.064, 1.55 \mu\text{m}$ 多个波段的使用要求。2017年,关姝等^[16]采用自由曲面设计了两反光学天线,口径为 80 mm,视场角为 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$,全视场 RMS 波前优于 $1/14 @ 1550 \text{ nm}$ 。该设计中主镜采用二次曲面,次镜采用由 Zernike 多项式表征的自由曲面。2018年,王蕴琦等^[17]设计了离轴两反光学天线,口径为 160 mm,视场角为 $\pm 1 \text{ mrad}$,放大倍率为 10,该设计对中地球轨道(MEO)激光通信具有一定的意义。

为了压缩后续光路体积,光学天线的出瞳需要位于快反镜附近。然而,现有的离轴光学天线的出

瞳均位于天线附近,存在出瞳距较短的缺点,因此需要中继光学系统对光学天线的出瞳进行二次成像^[18]。中继光路的后向散射光会对终端产生负面影响,且会增加激光终端的复杂度和重量,不利于小型化、轻量化设计。

针对上述问题,本文采用离轴四反光学结构,通过拉长光学天线的出瞳距,使光学天线的出瞳与后续快反镜相匹配,省去了出瞳二次成像的中继光路,这对于降低激光终端重量、减少后向散射光具有重要意义。

2 光学系统设计理论

2.1 无焦扩束系统

光学天线为无焦扩束系统,按照结构形式主要分为开普勒结构形式和伽利略结构形式,分别如图 1、2 所示。开普勒结构中物镜和目镜的光焦度均为正,伽利略结构中目镜的光焦度为正,目镜的光焦度为负。两种结构中扩束系统的目镜和物镜焦点重合,可实现入射光束、出射光束的收发控制^[19]。由图 1 可以看出,当入瞳位于物镜附近时,伽利略结构中扩束系统的正光焦度目镜可对入瞳成像,实现对出瞳位置的约束。

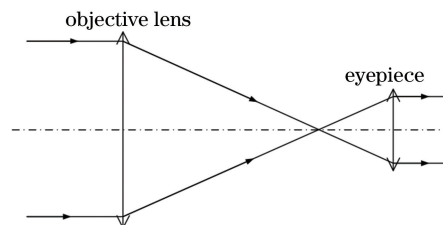


图 1 开普勒无焦系统

Fig. 1 Keplerian afocal system

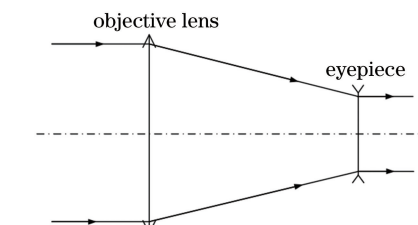


图 2 伽利略无焦系统

Fig. 2 Galilean afocal system

2.2 同轴三反系统设计理论

离轴三反系统的初始结构选取与同轴三反系统相同,只是在确定初始结构后取同轴系统的离轴部分使用,因此离轴三反初始结构可以采用同轴三反参数进行计算^[20]。

典型的同轴三反系统如图 3 所示,其中 M1 表

示主镜, M2 表示次镜, M3 表示三镜。设主镜、次镜和三镜的二次曲面系数分别为 e_1^2 、 e_2^2 和 e_3^2 , 次镜对主镜的遮拦比为 α_1 , 三镜对次镜的遮拦比为 α_2 , 次镜放大率为 β_1 , 三镜放大率为 β_2 。由图 3 可得, $\alpha_1 = l_2/f_1'$, $\alpha_2 = l_3/l_2'$, $\beta_1 = l_2'/l_2$, $\beta_2 = l_3'/l_3$, 其中 l_2 为次镜物距, l_3 为三镜物距, l_2' 为次镜像距, l_3' 为三镜像距, f_1' 为主镜焦距。

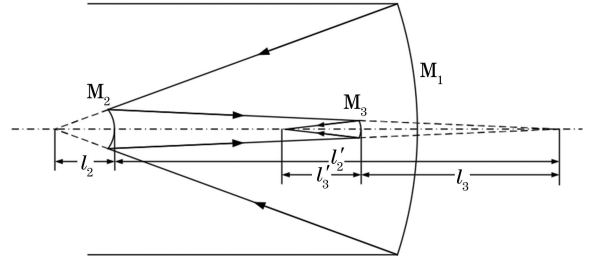


图 3 同轴三反示意图

Fig. 3 Layout of coaxial three-mirror system

由三级像差理论^[21]可得

$$S_I = \frac{1}{4} \times [(e_1^2 - 1)\beta_1^3\beta_2^3 - e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 + e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3 + \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2], \quad (1)$$

$$S_{II} = -\frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1^3)}{4\beta_1\beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3}{4\beta_1\beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$S_{III} = -e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} + \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2}, \quad (3)$$

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

式中: S_I 为球差的三级像差系数; S_{II} 为彗差的三级像差系数; S_{III} 为像散的三级像差系数; S_{IV} 为场曲的三级像差系数。

令 $S_I = 0, S_{II} = 0, S_{III} = 0, S_{IV} = 0$, 可得

$$e_1^2 = 1 + \frac{1}{\beta_1^3\beta_2^3} [\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3], \quad (5)$$

$$e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_3^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3 = (\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^3 - [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] \times (1 + \beta_2)(1 + \beta_2)^2 - 2\beta_1\beta_2, \quad (6)$$

$$e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} - e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} = \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2}, \quad (7)$$

$$\beta_1\beta_2 = \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2}. \quad (8)$$

当系统对出瞳位置有要求时,初始结构参数的计算可按如下步骤进行:1)根据系统外形布局要求,确定各反射镜间隔;2)根据出瞳位置、放大倍率、物镜和目镜焦距要求,确定各反射镜半径;3)根据像差理论,计算各反射镜二次系数,最终得到系统全部初始结构参数。将系统尺寸布局和像差理论相结合,确定合理的初始结构参数,为后续光学设计优化提供良好的初始结构。

3 系统设计与分析

3.1 系统指标要求

光学天线是精密光学系统,在设计过程中必须注意以下几点:1)满足光通信终端各项光学指标要

求;2)充分考虑小型化、轻量化。光学天线各项指标需要依据实际应用需求确定:1)空间激光通信的两个终端相距甚远,综合考虑光学天线的接收光能量和体积重量要求,确定通光口径为 120 mm。2)考虑激光通信终端捕获视场和跟踪精度要求,确定光学天线的视场为 $2.5 \text{ mrad} \times 2.5 \text{ mrad}$ 。3)工作波段 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,全视场 RMS 波前优于 $\lambda/12$, $1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ 视场内的 RMS 波前优于 $\lambda/25$ 。4)根据光学天线整体布局要求,入射光轴与出射光轴垂直,出瞳与望远镜机械端面的距离为 310 mm。可以看出, $1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ 视场内的波前要求较高,后续性能分析时需重点关注。综上所述,光学天线的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学天线的设计指标

Table 1 Design requirements of optical antenna

Parameter	Design index
Operating wavelength	1550 nm
Field of view	$2.5 \text{ mrad} \times 2.5 \text{ mrad}$
RMS wavefront	$\leq \lambda/12 @ 2.5 \text{ mrad} \times 2.5 \text{ mrad}$ and $\leq \lambda/25 @ 1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$
Distance between exit pupil and mechanical face	310 mm
Magnification factor	10

3.2 初始结构计算

由 2.1 节内容可得,本文中的光学天线对出瞳距有要求,因此必须选取开普勒结构形式中的扩束系统。

由于系统设计要求光轴垂直出射,因此系统中需加入折轴镜进行布局。考虑到光学系统的整体布局,在次镜和四镜之间加入平面折轴镜,光束经四镜反射后垂直出射。对于该结构形式的光学天线,主镜和次镜组成望远镜前组即物镜,三镜为平面镜用于折转光路,四镜为后组即目镜。综合考虑出瞳距离和无焦系统前后组焦点重合要求,将主次镜实焦点置于次镜和折轴镜之间,整体布局如图 4 所示。对于四个反射镜间隔、半径和二次系数取值,不仅要考虑前后组焦点重合要求,还要考虑系统出瞳距离要求。

考虑整体布局和外形尺寸要求,取主次镜焦点与四镜的距离为 340 mm,则四镜半径 $R_3 = 340 \text{ mm}$,四镜焦距为 $f'_4 = 170 \text{ mm}$ 。由系统 10 倍放大倍率要求可知,主次镜前组焦距应为 1700 mm。受光学天线通光口径的影响,令天线出瞳与四镜的距离为 $l'_4 = 450 \text{ mm}$ 。光学天线的外形要尽可能紧凑,取主次镜间隔为 130 mm,折轴镜与

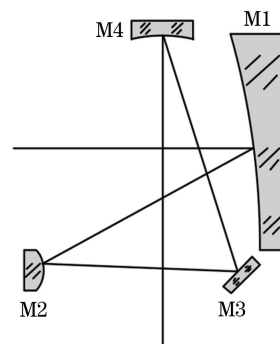


图 4 离轴四反光学天线的布局

Fig. 4 Layout of off-axis four-mirror optical antenna

次镜的间隔为 120 mm。结合四镜焦距 $f'_4 = 170 \text{ mm}$ 的初始条件,以出瞳位置为物,利用四镜、三镜、次镜依次对出瞳进行逆成像计算,最终将出瞳成像于主镜上即入瞳处。主镜半径由前组焦距为 1700 mm 的初始条件计算得到。依次运用几何光学物像关系,可计算得到三个初始焦距分别为 $f'_1 = 138.54 \text{ mm}$, $f'_2 = 9.3 \text{ mm}$, $f'_3 = 170 \text{ mm}$,次镜位置为 $l_2 = -8.54 \text{ mm}$, $l'_2 = -104.5 \text{ mm}$ 。因此, $\alpha_1 = -0.0616$, $\alpha_2 = -1.6268$, $\beta_1 = -12.2368$, $\beta_2 \rightarrow \infty$ 。至此,四个反射镜的焦距和间隔已经确定,接下来需确定反射镜二次系数。

考虑到加工和装配问题,初始结构中取主镜为抛物面,即 $e_1^2=1$,次镜和四镜的二次系数由第 2.2 节像差理论计算得到。令 $S_I=S_{II}=0$,将 $e_1^2=1$, $\alpha_1=-0.0616$, $\alpha_2=-1.6268$, $\beta_1=-12.2368$, $\beta_2 \rightarrow \infty$ 代入(5)式和(6)式,整理后可得

$$\alpha_2 - (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + e_2^2(1 + \beta_1)^3 - e_3^2\alpha_2 = 0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & e_2^2(\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)^3 - \\ & e_3^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)] = \\ & (\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \\ & [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)], \quad (10) \end{aligned}$$

解得, $e_2^2=1.3877$, $e_3^2=1$ 。

至此,光学天线设计所需的初始结构参数已全部确定,将初始参数代入 Zemax 光学设计软件中。将折轴镜和四镜偏转适当角度,以保证光轴近似垂直出射,得到的初始结构如图 5 所示。由图 5 可见,该离轴光学天线的初始结构布局紧凑合理,横向和纵向空间得到充分利用。但是,系统初始结构参数是由几何光学计算得到的,出瞳位置与指标要求还有出入。

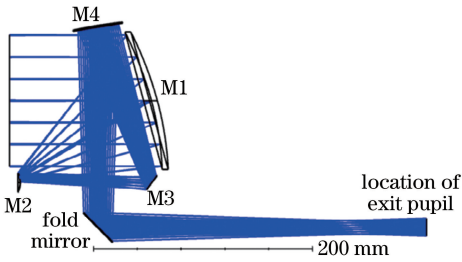


图 5 离轴光学天线的初始结构布局

Fig. 5 Layout of initial structure of off-axis optical antenna

光学天线初始结构前 12 个视场的点列图和调制传递函数(MTF)曲线分别如图 6 和图 7 所示,可见光学天线初始结构的波像差远未达到指标要求,必须对其进行优化。

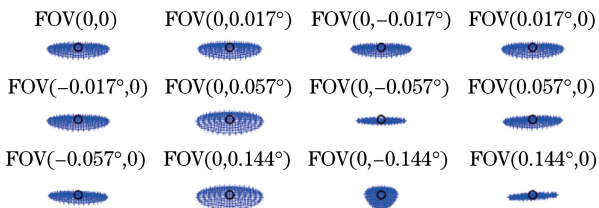


图 6 初始结构前 12 个视场的点列图

Fig. 6 Spot diagrams of top 12 FOVs of initial structure

3.3 优化设计与性能分析

由 3.2 节可见,光学系统初始结构的性能与指标要求相距甚远,必须对系统进行优化。在优化过

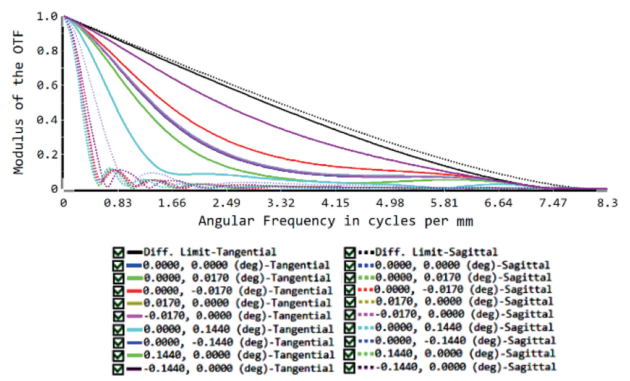


图 7 初始结构的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of initial structure

程中,采用 Zemax 软件的无焦像空间模式控制各反射镜间隔、出瞳位置和大小等参数,优化后的光学天线光路如图 8 所示。

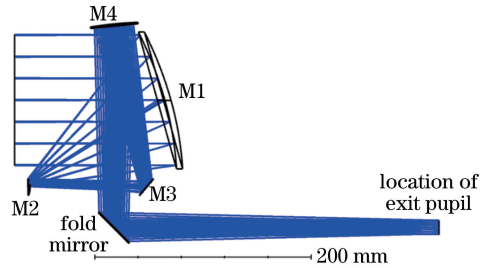


图 8 优化后的光学天线布局

Fig. 8 Layout of optical antenna after optimization

光学天线为无焦扩束系统,用于光能发射和接收,对于场曲、畸变的要求不高。因此,本文设计的离轴光学天线主要从点列图、MTF 曲线、波前误差、衍射包围圆能量等方面进行性能评价。

点列图反映入射光线在像面的集中程度。图 9 为优化后的光学天线点列图。由图 9 可见,1 mrad \times 1 mrad 视场内的光斑对称性好,边缘视场光斑为椭圆形。边缘视场存在较大像散,难以校正,但是光斑依然完全落在艾里斑内,且波像差满足要求。

衍射包围圆能量反映了光斑能量集中程度。图 10 为优化后的光学天线衍射包围能量图。由图 10 可见,90% 能量集中于 0.3 mrad \times 0.3 mrad 视场内,说明该光学天线可以实现光能的高效收发。

RMS 波前误差反映了系统波前随视场的变化。图 11 为优化后的光学天线均方根波前误差图。由图 11 可见,系统的全视场 RMS 波前误差优于 1/17@1550 nm,且全部小于衍射极限。1 mrad \times 1 mrad 视场内的 RMS 波前优于 1/65@1550 nm,完全满足指标要求。

MTF 反映了光学系统对不同空间频率入射光的传递能力。图 12 为优化后的光学天线 MTF 曲

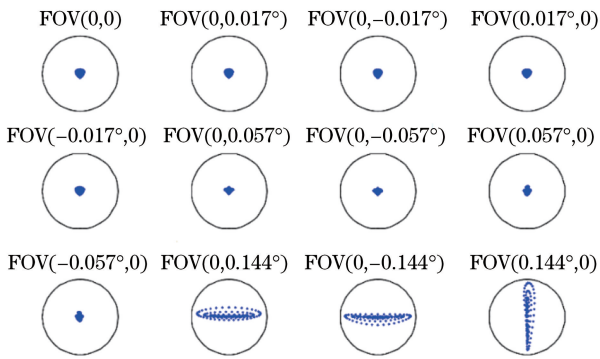


图 9 优化后光学天线前 12 个视场的点列图

Fig. 9 Spot diagrams of top 12 FOVs of optical antenna after optimization

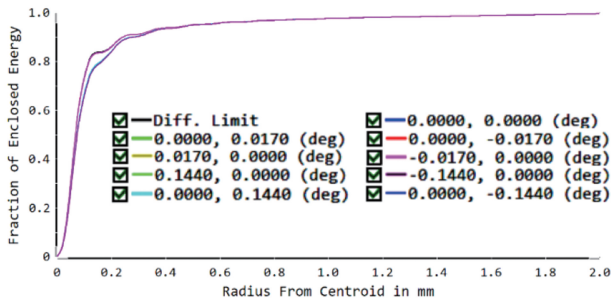


图 10 优化后的光学天线衍射包围能量图

Fig. 10 Diffraction encircled energy of optical antenna after optimization

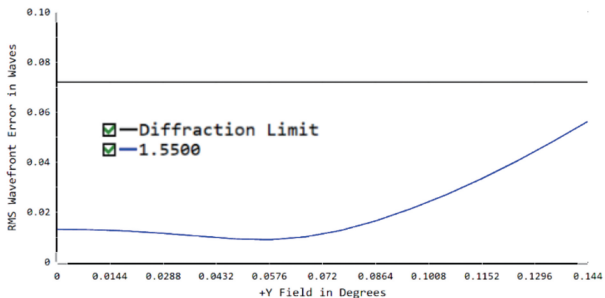


图 11 优化后的光学天线均方根波前误差图

Fig. 11 RMS wavefront error of optical antenna after optimization

线。由图 12 可见,系统在全视场内的 MTF 均具有较高数值,且在 $1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ 视场内达到衍射极限。

通过以上性能分析可见,本文设计的离轴光学天线性能优异,结构紧凑,设计结果满足指标要求,完全满足激光通信终端应用需求。

3.4 公差分析

受生产加工装配过程中各种误差的影响,光学系统的最终性能有所下降,因此系统设计完成后必须进行公差分析。二次曲面系数误差 (Conic error)、半径误差 (Radius error)、偏心误差

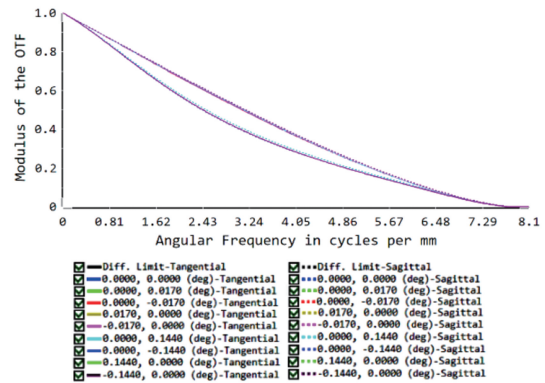


图 12 优化后的光学天线 MTF 曲线

Fig. 12 MTF curves of optical antenna after optimization (Decenter error) 和倾斜误差 (Tilt error) 如表 2 所示。以主镜为基准进行后光路调节。三镜为平面镜,用于折转光路,对系统波像差无影响。

表 2 光学天线的公差值

Table 2 Tolerance value of optical antenna

Mirror	Conic error	Radius error / mm	Decenter error / mm	Tilt error / (")
Primary mirror	0.001	0.1	Standard	Standard
Secondary mirror	0.001	0.01	0.02	10
Fourth mirror	0.001	0.1	0.02	60

将上述数据代入 Zemax 软件,基于蒙特卡罗方法,采样 100 次进行公差分析,得到不同视场波像差出现的概率,光学天线的公差分析结果如表 3 所示。

表 3 光学天线的公差分析结果

Table 3 Tolerance analysis result of optical antenna

Probability	0	$1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$	$2.5 \text{ mrad} \times 2.5 \text{ mrad}$
90%	0.031	0.034	0.082
80%	0.029	0.032	0.081
50%	0.025	0.028	0.080
20%	0.023	0.026	0.079
10%	0.023	0.026	0.079

由表 3 可见,在 90% 概率下,系统各视场波像差均满足指标要求,表明该离轴光学天线的公差合理,设计结果满足激光通信终端性能要求。

4 结 论

针对传统离轴反射光学天线出瞳距较短,需要中继光学系统拉长系统出瞳距的缺点,设计了长出瞳距离轴四反光学天线。通过拉长光学天线的出瞳

距,直接将出瞳设计于快反镜上,省去了中继光学系统,有利于提升激光通信终端的集成度和隔离度。根据出瞳位置要求和光学天线外形尺寸要求,通过逆向计算得到各反射镜的间隔和半径。结合同轴三反像差理论,计算得到各反射镜的二次系数,进而确定了光学天线的初始结构参数。采用 Zemax 软件进行光线追迹和性能优化,完成了长出瞳距离轴四反光学天线的设计。系统口径为 120 mm,放大倍率为 10,视场角为 $2.5 \text{ mrad} \times 2.5 \text{ mrad}$,全视场 RMS 波前优于 $1/12@1550 \text{ nm}$ 。最后,采用 Zemax 软件进行公差分析和性能分析,结果表明,该系统结构紧凑,公差合理,性能优越,各项性能满足指标要求。所提方法对后续该类光学系统的设计具有指导意义。后续会进行离轴四反长出瞳距光学天线装调方法的研究。

参 考 文 献

- [1] Wang Y T, Yang S H, Li Z, et al. Design of compound free space optical/millimeter wave antenna for communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1206001.
王一婷, 杨苏辉, 李卓, 等. 用于通信的自由空间光/毫米波复合天线设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1206001.
- [2] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 143-150.
任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. *激光与红外*, 2019, 49(2): 143-150.
- [3] Li X, Liu M, Li X M, et al. Design of multipurpose optical antenna for laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020602.
李响, 柳鸣, 李小明, 等. 多用途激光通信天线设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020602.
- [4] Liu W D, Luo Z B, Li X, et al. Optimized design of baffle for laser communication system on geostationary orbit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0206005.
刘伟达, 罗忠宝, 李响, 等. 地球静止轨道激光通信系统的遮光罩优化设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0206005.
- [5] Zhao B Q, Meng L X, Yu X N, et al. Spatial light to single-mode fiber nutation coupling technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1105001.
赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章动耦合技术研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1105001.
- [6] Song Y S, Chang S, Tong S F, et al. Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206004.
- [7] Teng Y J, Song Y S, Tong S F, et al. Acquisition performance of laser communication system based on airship platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606005.
滕云杰, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 基于飞艇平台激光通信系统的捕获性能研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606005.
- [8] Zhang Z, Sun J F, Lu B, et al. Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805006.
张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805006.
- [9] Yang C L. Optical Antenna design and stray light research based on inter-satellites laser communication terminal [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 11-27.
杨成龙. 基于星间激光通信终端的光学天线设计与杂散光研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 11-27.
- [10] Song Z H, Jiang L, Cao H S, et al. Aspheric homogenizer applying in space laser communication terminal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100601.
宋志化, 江伦, 曹海帅, 等. 非球面整形镜在空间激光通信终端中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100601.
- [11] Xi X D, Wu H. Design of UV communication receiving optical system in the surface layer based on off-axial TMA structure [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(10): 101002.
奚小东, 吴晗平. 近地层紫外通信离轴三反接收光学系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(10): 101002.
- [12] Fischer E, Adolph P, Weigel T, et al. Advanced optical solutions for inter-satellite communications [J]. *Optik*, 2001, 112(9): 442-448.
- [13] Yu J J, Li X J, Tan L Y, et al. Off-axis optical telescope for satellite laser communication terminal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1890-1895.
俞建杰, 李宣娇, 谭立英, 等. 离轴天线在卫星激光

- 通信系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1890-1895.
- [14] Zhao Y Y. Study on the optical system of space coherent optical communication terminal [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 60-64.
赵意意. 空间相干光通信终端光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 60-64.
- [15] Sun Q S, Zhao F C, Chen K F, 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.
- [16] Guan S, Wang C, Tong S F, et al. Optical 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.
关姝, 王超, 佟首峰, 等. 空间激光通信离轴两镜反射望远镜自由曲面光学天线设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1222003.
- [17] Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, et al. Design of laser communication optical system with off-axis common aperture [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 010602.
王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 离轴式共口径激光通信光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 010602.
- [18] Talmor A G, Harvard H, Chen C C. Two-axis gimbal for air-to-air and air-to-ground laser communications [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390G.
- [19] Li X T, Cen Z F. Geometrical optics, aberrations, and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 204-216.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 204-216.
- [20] Xu F G, Huang W, Xu M F. Design of off-axis three-mirror optical system based on Wassermann-Wolf equations [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1222002.
徐奉刚, 黄玮, 徐明飞. 基于 Wassermann-Wolf 方程的离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222002.
- [21] Pan J H. The design manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130-141.
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: 130-141.