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

关 姝[1,2],王 超[1,2],佟首峰[1,2],姜会林[1,2],常 帅[1,2],范雪冰[1,2]

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 空间光电技术研究所,吉林 长春 130022)

摘 要:同轴两反结构作为空间激光通信光学天线时常存在接收视场小、发射效率低等缺点。同时,因中心遮拦造成的能量损失,也会大大降低通信系统的瞄准和捕获概率。针对此缺陷,提出采用离轴两反天线结构并引入自由曲面设计以提高通信系统的性能。由初级像差理论推导得出离轴两反系统的初始结构,并采用 Zernike 多项式自由曲面面形,增加系统设计自由度,提高系统平衡像差的能力。给出入瞳口径与焦距相同的同轴两反和离轴两反系统的设计实例,并比较二者的光学传递函数 MTF、点列图、衍射包围圆能量、波前误差等。结果表明:离轴两反自由曲面天线的像质明显优于同轴两反天线,因而该种天线结构的使用可提升空间激光通信系统的整体性能。

关键词:空间激光通信; 光学天线; 离轴两镜反射结构; 自由曲面
中图分类号:TH74 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.1222003

Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication

Guan Shu[1,2], Wang Chao[1,2], Tong Shoufeng[1,2], Jiang Huilin[1,2], Chang Shuai[1,2], Fan Xuebing[1,2]

(1. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The coaxial two-mirror reflective structure has the disadvantage of small receiving field of view and low emission efficiency when being used as optical antenna in space laser communication. At the same time, the energy loss caused by central obscuration will greatly reduce the aiming and capturing probability of communication system. For this inherent defects, an off-axis two-mirror reflective structure with freeform surface was designed to improve the performance of space laser communication. The initial structure of the off-axis two-mirror reflective structure was deduced according to the basic aberration theory. Zernike polynomial freeform surface was introduced to improve the ability of designing freedom and balancing the freeform surfaces aberration. A design example was given whose coaxial and off-axis two-mirror reflective system had same pupil aperture and focal length, and the modulation transfer function, spot diagram, diffraction encircled energy and wavefront error were compared. The results show that the image quality of the off-axis two-mirror reflective antenna with freeform surface is better than

收稿日期:2017-04-05; **修订日期**:2017-06-10
基金项目:国家自然科学基金(91338116,91438204);吉林省教育厅基金(【2016】369);长春理工大学自然科学青年基金(WQNJJ-2016-15)
作者简介:关姝(1988-),女,硕士生,主要从事空间激光通信中的光学天线设计方面的研究。Email:grace_guans@163.com
导师简介:佟首峰(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事空间激光通信、空间光学遥感、光电检测和光电跟踪等方面的研究。Email:tsf1998@sina.com
通讯作者:王超(1986-),女,讲师,博士,主要从事空间激光通信中的光学设计和偏振定标、偏振补偿方面的研究。Email:nicklo19992009@163.com

that of the coaxial, thus, the structure of the off-axis two-mirror reflective antenna structure could improve entire performance of space laser communication system.

Key words: space laser communication; optical antenna; off-axis two-mirror reflective structure; freeform surface

0 引 言

空间激光通信是以激光束作为载波，在空间进行数据、语音、图像等信息传输的一种通信技术。由于采用激光作为信息载体，光束被压缩在一个很窄的范围内,因此通信安全性高。除此之外,空间激光通信系统具有体积小、质量轻、功耗低等优点,也满足了空间探测活动对卫星有效载荷的要求，有利于整个系统的设计[1]。基于以上优点,空间光通信技术已引起世界各国的高度重视，并逐渐成为通信领域的研究热点。

光学天线是光学终端收发系统公用的通道,其设计质量是整个光通信系统信号发射和接收的关键，直接影响系统的通信性能 [2]。在空间激光通信中,性能良好的光学天线指标应具备如下要求:(1) 收发效率高。空间光通信是对远距离间微弱信号的传输与探测,必须保证极高的能量利用率。(2) 视场大。通常，空间激光通信技术先是对两个高速运动的终端进行瞄准和捕获,之后再对其进行有效跟踪,以完成动态通信。因此,要提高瞄准和捕获概率,就必须要求接收端的视场足够大。(3) 成像质量好。为满足瞄准、捕获、跟踪的需求,接收端光斑能量的集中程度、形状和大小都要达到标准。(4) 加工、装调和检测精度高。一般要求均方根(RMS)波前误差在 10/λ~30/λ 之间。(5) 质量轻、体积小[3]。

目前已投入实际使用的激光通信光学天线具有多种结构设计形式，主要分为透射式和反射式两种结构。如日本的 LCE 光学终端采用的是透射式光学天线,加工、装调简单,但需要多种玻璃的配合才能消除色差,且难以做大口径,实际口径只有 75 mm[4]。比起透射式结构,反射式光学天线具有无色差、轻小型化等优点，又可分为同轴反射式和离轴反射式结构。同轴反射式主要为卡塞格林两反结构,如美国月球激光通信演示(Lunar Laser Communication Demonstration,LLCD)系统的星载激光通信终端望远系统即采用此结构,其口径为 108 mm,视场为 0.1°[5]。该结构可以满足一般应用需求,同时存在一些缺陷:首先,存在次镜遮挡和主镜中空，不但会造成收发光束能量的损失，而且被遮挡的部分发射激光束可能直接反射到终端内部成为杂光，影响接收光学系统的性能[6]。其次,同轴两反系统可用来消除像差的变量太少,在大视场下难以获得良好像质,因此设计视场一般不大于 0.5°。针对以上缺陷,研究者提出采取不存在中心遮挡的离轴方法，可大大提高接收和发射效率。同时,由于采用离轴设计,设计自由度有所增加,平衡轴外像差的能力也有所增强，因此可提高大视场内的瞄准和捕获概率[7]。离轴反射式天线如瑞士 Contraves 公司设计的 OPTEL 终端光学系统,采用的是离轴四反光学天线结构,口径为 135 mm,放大率为 10 倍。其结构紧凑、无色差,但由于元件离轴量大,因此加工和装调难度极大[8]。2013 年,俞建杰等人设计了口径为 100 mm、视场为 2°×2°的离轴三反卫星激光通信光学天线[9]。2015 年,赵意意等人对 OPTEL 光学天线结构作了进一步的改进,设计了视场为 7 mrad、放大率为 15 倍的离轴四反光学天线系统[4]。然而,在实际设计和制造过程中,离轴三反和四反系统加工成本较高,结构设计复杂,装配及调试十分困难。对此,文中提出采用离轴两反结构,在减小加工装调复杂度的同时，有效提高系统光能利用效率。由于离轴两反系统中的设计变量相对三反、四反系统较少，可引入自由曲面来进一步消除非对称像差。同时,离轴系统的非对称性会对系统像质造成影响，而光学自由曲面的运用则有利于消除非对称像差。2015 年,Suryakant Gautam 等人即设计了焦距为 439 mm、视场角为 2°×2°的离轴两反式系统,并采用 *XY* 多项式对系统次镜进行表征[10]。

文中给出了离轴两反光学结构的设计方法,同时利用 Zernike 多项式面形来平衡像差以增大系统视场,提高像质,从而获得 2.4°×2.4°的大视场离轴两反光学天线。结合激光通信系统对光学天线的要

求,比对了同轴和离轴两反系统的性能。

1 Zernike 多项式自由曲面表征

利用自由曲面来表征光学表面，可增加系统设计自由度、提高像差平衡能力,其在提高光学性能、简化结构方面有着球面和普通高次非球面无法比拟的优势[11-12]。由于光学系统的使用需求和加工方式不同,自由曲面的表征也存在各种数理模型。常见的光学自由曲面表征方法有:变形非球面、非均匀有理 B 样条 NURBS、XY 多项式、φ 多项式、Forbes 多项式、Zernike 多项式及径向基函数等。该设计采用 Zernike 多项式来描述离轴两反系统的次镜表面。

Zernike 多项式在圆域上相互正交,其方程表达式为:

$$Z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{i=1}^{N}A_iZ_i \tag{1}$$

式中:c 为曲率半径;k 为圆锥常数;r 为径向半径;A_i 为 Zernike 多项式系数。Zernike 多项式在传统高次非球面的基础上进行拓展,增加了设计自由度,更有效地对离轴像差进行校正，由此使系统在大视场下所成像质良好。在表征光学自由曲面方面,它以标准二次曲面作为基础面型,通过对多项式中的像散项、彗差项、球差项,以及各高级像差项的叠加,实现自由曲面的表征，可有针对性地对各类和各级像差进行校正[13]。

2 初始结构设计

该设计中离轴两反系统的初始结构是以同轴两反的初始结构推导得出。同轴两反光学系统的初始结构如图 1 所示。

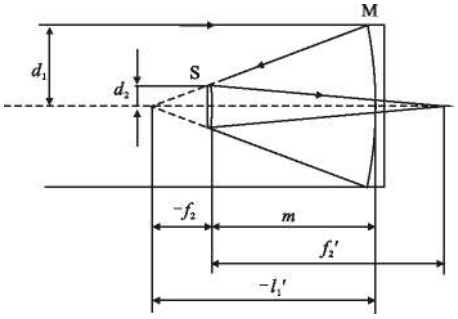


图 1 同轴两镜系统的基本结构

Fig.1 Basic structure of the coaxial two-mirror system

图中,M、S 分别代表主镜和次镜，其曲率半径分别为 R_1、R_2,主次镜的遮挡比用 α 表示。d_1、d_2 分别为主次镜口径的一半,$-f_2$、f_2' 分别代表次镜 S 的物距和像距,m 为 M 与 S 间的距离,$-l_1'$ 为主镜 M 焦距。物体位于无穷远处,光阑位于主镜上,其中 M、S 的二次曲面系数分别为 e_1^2 和 e_2^2,S 的放大率为 β,则 α 和 β 满足下式:

$$\alpha=\frac{f_2}{l_1'}\approx\frac{d_2}{d_1}$$

$$\beta=\frac{f_2'}{f_2}=\frac{u_2}{u_2'}$$

$$l'=\beta\cdot l \tag{2}$$

再利用高斯公式 $\frac{1}{f_2'}+\frac{1}{f_2}=\frac{2}{R_2}$ 还可以推导出:

$$R_2=\frac{\alpha\beta}{1+\beta}R_1 \tag{3}$$

由于光学天线系统为能量系统，可以消除的初级像差为:彗差、球差、像散及场曲。其三级像差分别为 S_{I}、S_{II}、S_{III} 和 S_{IV}。根据像差理论,可得到以上像差的表达式为:

$$S_{\mathrm{I}}=\left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4}-\frac{\alpha(\beta-1)^3}{4}e_2^2\right]-\frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2)$$

$$S_{\mathrm{II}}=\frac{1-\alpha}{\alpha}\left[\frac{\alpha(1+\beta)^3}{4\beta}e_2^2-\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta}e_2^2\right]-\frac{1}{2}$$

$$S_{\mathrm{III}}=\left[\frac{\alpha(1+\beta)(\beta-1)^2}{4\beta^2}-\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^2}e_2^2\right]-\frac{(1-\alpha)(1+\beta)(\beta-1)}{\alpha\beta}-\frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha}$$

$$S_{\mathrm{IV}}=\beta-\frac{1+\beta}{\alpha} \tag{4}$$

由以上公式(2)~(4)可知,现有四个变量 α、β、e_1^2 和 e_2^2 可以用来校正系统像差,其中 α 和 β 为与轮廓尺寸有关的参数。可根据消像差公式来对参数和尺寸进行设计,以达到要求。同轴两反结构一般采用卡塞格林系统,该结构只可消除球差,主镜为抛物面,其面形系数为 1,由消球差公式可得:

$$e_2^2=\frac{(1-\beta)^2}{(1+\beta)^2} \tag{5}$$

带入公式(4)中,可得 $S_{\mathrm{II}}=1/2$。

设计时需对同轴两反系统的主、次镜采取适当离轴。为避免中心遮挡,应将主光线进行偏折,次镜下移。设次镜的离轴量为 h,则 h 可表示为:

$$h=(d_1+d_2)\cdot\Delta d \tag{6}$$

式中：Δd 为避免机械结构干扰光路所留余量。主次镜间距为 m，设主镜偏转角度为 θ，则主光线偏转角度为 2θ。因此，次镜的偏转量可表示为：

$$t=m\cdot\tan 2\theta \tag{7}$$

下面适当调整主镜的离轴量及次镜的倾斜量，使像面垂直位置在主镜上方，水平位置在主次镜之间。调整主次镜间距及次镜到像面的距离，最小化离轴两反结构的体积。最后在一定约束下优化系统各结构参量，直到像质满足设计要求。

3 设计实例

确定光学天线的像质指标为：视场角 2.4°×2.4°，传递函数大于 0.3(50 lp/mm)，RMS 波前误差优于 λ/14(全视场)，光斑直径(90%能量)最大 3×3 像元。具体设计参数为：入瞳口径为 80 mm，工作波长 1 550 nm，系统焦距为 440 mm，像元尺寸为 20 μm。

同时设计了一个同轴两反和一个离轴两反天线结构，便于比较二者之间的性能差异。利用光学设计软件 CODE-V 进行优化。所得结构参数分别如表 1 和表 2 所示，光路图如图 2 和图 3 所示。

表 1 同轴两反天线结构参数

Tab.1 Parameters of coaxial two-mirror reflective antenna structure

Surf: Type		Radius/mm	Thickness/mm
OBJ	Standard	Infinity	Infinity
STO	Standard	Infinity	240.00
1	Conic	−1 133.47	−224.23
2	Conic	2 379.78	266.42
IMA	Standard	Infinity	−

表 2 离轴两反天线结构参数

Tab.2 Parameters of off-axis two-mirror reflective antenna structure

Surf: Type		Radius/mm	Thickness/mm
OBJ	Standard	Infinity	Infinity
STO	Standard	Infinity	400.00
1	Conic	−1 191.76	−384.06
2	Zernike	1 050.78	383.31
IMA	Standard	Infinity	−

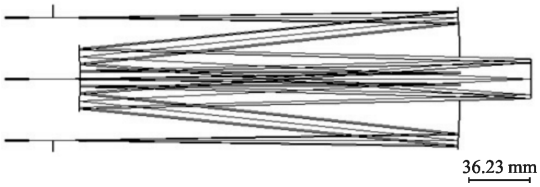


图2 同轴两反系统结构图

Fig.2 Layout of coaxial two-mirror reflective system structure

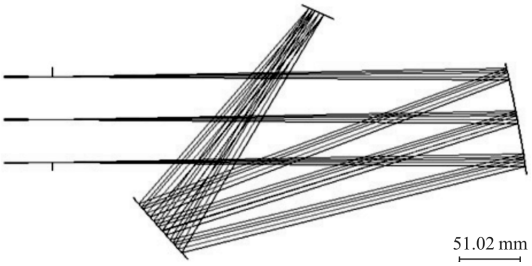


图 3 离轴两反系统结构图

Fig.3 Layout of off-axis two-mirror reflective system structure

在离轴两反系统中，为了校正轴外像差，主镜采用二次曲面，次镜则采用 Zernike 多项式表征的自由曲面，其中 Zernike 多项式的第 5~25 项系数参与优化。主、次镜的离轴情况如表 3 所示。

表 3 离轴两反光学系统主、次镜离轴参数

Tab.3 Off-axis parameters of primary and secondary mirror in off-axis two-mirror reflective optical system

Surf: Type	M1	M2	IMA
Tilt/(°)	3	33	63.7
Decenters/mm	141	−125	200

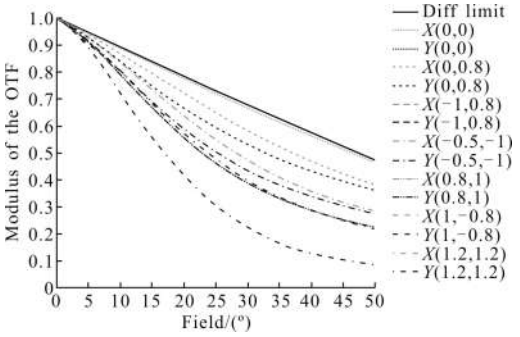
在相同入瞳口径前提下，在系统体积方面，同轴两反系统子午截面上横向长度为 266.42 mm，纵向长度 80 mm。而离轴系统横向长度为 383.53 mm，纵向长度为 119.35 mm。可见离轴系统的外包络略大于同轴系统，但离轴系统性能远优于相同口径、焦距的同轴系统，将在后文加以说明。

4 同轴与离轴天线性能对比

同轴两反结构存在中心遮挡，在平面波入射情况下，能量损失达 30%，在激光高斯光束入射情况下，能量损失会更高。此外，从以下几个方面对同轴两反和离轴两反光学结构的性能进行对比：调制传

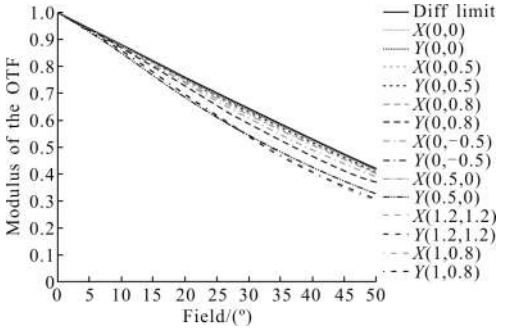
递函数、点列图、包围圆能量、波前误差和畸变网格。

光学传递函数 MTF 反映了光学系统对入射光束不同频率成分的传递能力。如图 4 可知：只有在中央视场 0°时，同轴两反系统的 MTF 曲线才接近衍射极限，MTF 值随视场增加而迅速下降，在 50 lp/mm 处边缘半视场 1.2°×1.2°的 MTF 值为 0.08，远未满足设计要求。而离轴两反系统由于加入自由曲面设计，在增加系统设计自由度的同时，能有效校正离轴像差。由此离轴系统在全视场内的 MTF 值均满足设计要求，其中边缘视场 1.2°×1.2°的 MTF 值超过 0.3。由以上可见，相比于传统同轴两反系统，离轴两反系统与自由曲面的组合更适用于大视场接收。



(a) 同轴两反系统

(a) Coaxial two-mirror reflective system



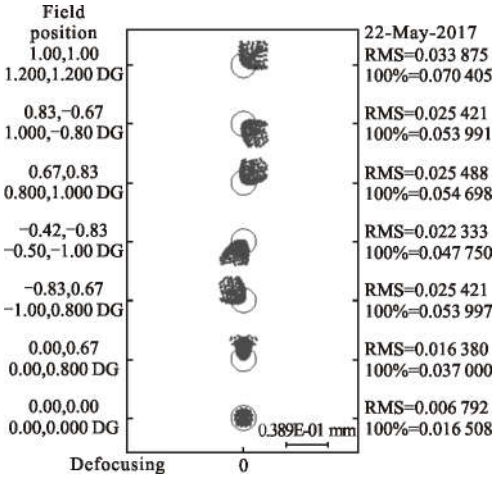
(b) 离轴两反系统

(b) Off-axis two-mirror reflective system

图 4 MTF 曲线图

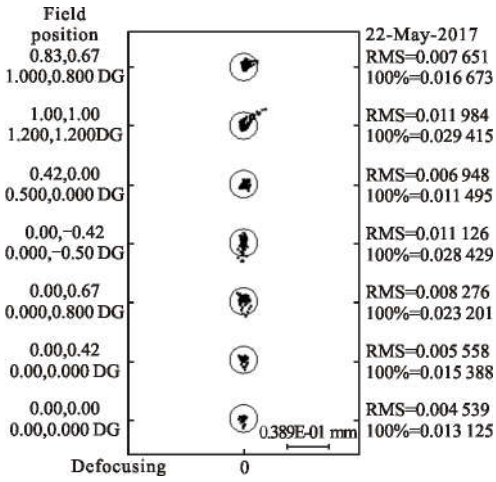
Fig.4 MTF curves

由于存在像差，几何光线入射至像平面内不再集中于一点，点列图就是通过这些点的密集程度来衡量光学系统的成像质量。由于两系统具有相同的口径 D 和焦距 f。根据公式 $r=1.22\lambda f/D$（λ 为工作波长）可得系统艾里斑半径为 10.4 μm。同轴两反系统中，中心视场 0°×0°的均方根半径为 6.7 μm，小于艾里斑半径，而其余视场的均方根半径均大于艾里斑半径。在边缘视场 1.2°×1.2°所成像光斑的均方根半径为 33 μm，远大于艾里斑半径。而在具有自由曲面次镜的离轴两反系统中，除了边缘最大视场 1.2°×1.2°成像光斑半径达到最大为 11 μm 外，其余视场均小于艾里斑半径，满足设计要求。由此可见，离轴两反光学系统的像质良好，接近衍射极限。



(a) 同轴两反系统

(a) Coaxial two-mirror reflective system



(b) 离轴两反系统

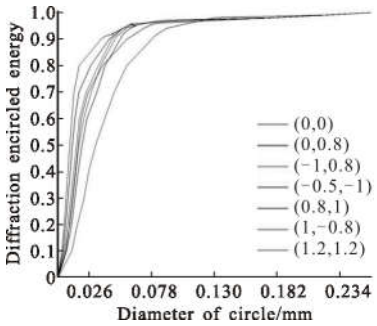
(b) Off-axis two-mirror reflective system

图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

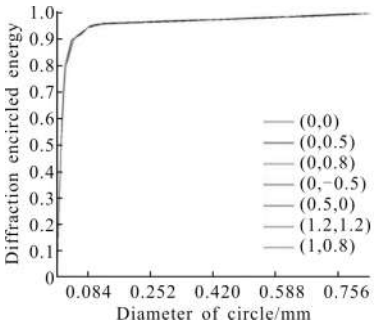
系统光斑能量的集中程度通常可以通过衍射包围圆能量来反应。如图 6 可知：同轴两反系统中，较小视场内光束能量比较集中，90%能量所对应的包围圆最小光斑直径为 35 μm 左右，而在 1.2°×1.2°半视场时 90%能量所对应的光斑直径达到 78 μm。在

加入自由曲面的离轴两反系统中，全视场内的包围圆光斑直径基本不变，其中 1.2°×1.2°半视场 90%能量所对应的光斑直径最大为 45 μm，在三个像元宽度以内，完全满足系统设计要求。



(a) 同轴两反系统

(a) Coaxial two-mirror reflective system



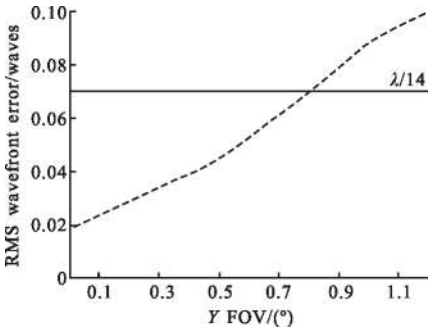
(b) 离轴两反系统

(b) Off-axis two-mirror reflective system

图 6 包围圆能量图

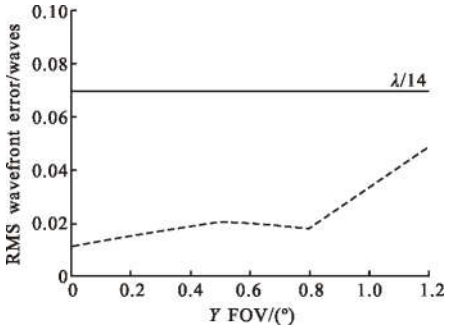
Fig.6 Encircled energy

系统的波前变化是通过 RMS 波前误差反应的。对比图 7 可知：在同轴两反系统中，当半视场逐渐增大至 0.8°×0.8°时，RMS 波前误差已大于 λ/14，在 1.2°×1.2°时最大波前误差为 0.102λ，不满足设计要



(a) 同轴两反系统

(a) Coaxial two-mirror reflective telescope



(b) 离轴两反系统

(b) Off-axis two-mirror reflective system

图 7 均方根波前误差图

Fig.7 RMS wavefront error

求。而在加入自由曲面表征的离轴两反系统中，1°×1°视场内，RMS 波前误差始终优于 λ/14，其中在边缘半视场 1.2°×1.2°处达到最大波前误差为 0.056λ，满足设计要求。

畸变值越小越有利于光斑质心的精确定位，以此提高跟踪和捕获的精度。离轴两反系统的网格畸变如图 8 所示，在全视场内，最大畸变值为 0.72%，出现在探测器四角边缘。

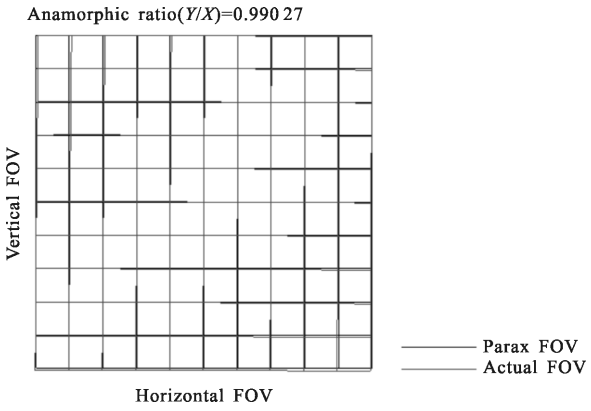


图 8 离轴两反系统的畸变网格

Fig.8 Grid distortion of off-axis two-mirror system

通过对同轴两反和离轴两反优化结果及性能的分析可知：在小视场角情况下，同轴两反系统和离轴两反系统的性能均能满足设计要求。而随着视场角的逐渐增大，同轴两反系统的性能迅速下降，各指标不能满足设计要求。而含自由曲面的离轴两反系统在视场增加到 2.4°×2.4°时，光学性能依然稳定，并接近衍射极限。

文中的离轴两反光学系统与参考文献[10]中的

相近离轴两反系统(视场 2°×2°,主次镜沿光轴间距 432.30 mm)相比,二者口径、焦距相同,像质均接近衍射极限。但文中离轴两反系统采用 Zernike 多项式自由曲面数理模型中的 5~25 项多项式系数参与优化,精心校正高级像差,在相同口径下使得系统视场更宽(视场 2.4°×2.4°),结构更紧凑(主次镜沿光轴间距 383.31 mm),不仅能够增加通信信号光捕获概率,而且更适合应用于星载光学天线。

文中含自由曲面的离轴两反设计与以往三反、四反光学天线设计相比,参考文献[9]中离轴三反天线的 F 数为 5,视场为 2°×2°。参考文献[4]中离轴四反天线 F 数约 10,视场为 14 mrad(约 0.8°)。可见文中的两反系统与以往三反、四反光学天线设计相比,在集光能力与探测范围方面水平相当甚至略高。但两反系统的缺点是水平尺寸较长,如文中系统(口径80 mm)水平包络尺寸约为 383 mm,大约为参考文献[9]中口径 100 mm 三反系统的水平尺寸(230 mm)的 1.6 倍。

5 同轴与离轴天线实际应用可行性比较

该节将从技术成熟度、装调难度和系统性能各方面综合考虑,比较同轴两反与含自由曲面离轴两反光学天线的应用可行性。技术成熟度方面,同轴两反卡式天线已是常规光学系统,其加工、检测不需额外补偿器。而文中离轴两反系统主镜为离轴二次曲面,次镜为 Zernike 面,需制造相应的计算全息补偿器(CGH)进行加工、检测[14]。装调难度方面,同轴反射式系统装调公差灵敏度低,利用定心装调方式即可将系统光轴与机械轴重合。而离轴反射式系统不能使用这种方法,必须建立光学系统中元件失调量与像差关系即计算机辅助装调模型,在系统装调过程中对不同视场成像质量实时检测,由计算机对系统实时波像差数据进行计算后给出各个光学元件失调量。而在二者系统性能方面如前文所述,同轴反射式系统仅在视场不超 0.5°前提下具有优良像质,且能量利用率较低(文中不超过 70%)。含自由曲面离轴反射式系统两个方向上的视场角均可达 2.4°,像质接近衍射极限,且无遮拦造成的能量损失。总而言之,在星间、星地激光通信链路对信号捕获时间日益要求缩短,信号光斑质量日益要求提高,链路距离日益要求增加的前提下,增大视场、改善像质、提高能量利用率是光学天线不变的追求;在计算机辅助设计装调技术不断进步的前提下,含自由曲面的离轴两反式光学系统在实际中的应用优势将更加凸显。

6 结 论

文中讨论了适用于激光通信系统天线的离轴两反系统初始结构的具体设计方法。根据空间激光通信对光学天线的使用需求,分别设计了具有相同口径和焦距的同轴和离轴两反结构。同时,利用 Zernike 多项式对离轴两反系统的次镜面形进行表征,从而达到平衡像差、增大视场的效果。利用光学设计软件 CODE V 对两系统的 MTF 曲线、点列图、包围圆能量、波前误差等评价指标进行分析,结果表明:同轴两反光学系统存在中心遮拦,会造成严重能量损失,且不能满足大视场光学天线的设计要求。采用离轴两反光学结构大大提高了发射接收效率,而自由曲面面形的采用能有效提高系统整体的成像质量,更好地满足设计要求。随着自由曲面加工工艺技术的更新、检测精度的提升,及计算机装调技术的不断发展,含自由曲面的离轴反射式光学天线将成为今后空间激光通信光学系统的重要发展方向。

参考文献:

[1] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong, et al. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-2. (in Chinese)
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-2.

[2] Li Shaohui, Chen Xiaomei, Ni Guoqiang. Highly precise ground certification system of satellite laser communication [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(5): 1149-1158. (in Chinese)
李少辉, 陈小梅, 倪国强. 高精度卫星激光通信地面验证系统[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(5): 1149-1158.

[3] Cheng Yanyan. Research of space laser communication optical system [D]. Xi′an: Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 16-19. (in Chinese)
程彦彦. 星载激光通信终端光学系统研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012: 16-19.

[4] Zhao Yiyi. Study on the optical system of space coherent

optical communication terminal [D]. Xi′an: Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 60-63. (in Chinese)
赵意意. 空间相干光通信终端光学系统研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2015: 60-63.

[5] Guo Lihong, Zhang Liang, Du Zhongwei, et al. A survey of lunar laser communication demonstration of NASA [J]. ***Journal of Spacecraft TT&C Technology***, 2015, 34(1): 87-94. (in Chinese)
郭丽红, 张靓, 杜中伟, 等. NASA 月球激光通信演示验证试验[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(1): 87-94.

[6] Ran Yinghua. Research on optical system of space borne laser communication terminal [D]. Chengdu: University of Electronic Technology of China, 2009: 15-17. (in Chinese)
冉英华. 空间光通信中光学天线系统的设计及性能分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 15-17.

[7] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)
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.

[8] Wang Xinlei. Optimized design of reflective optical antenna used in satellite laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 27-28. (in Chinese)
王鑫磊. 卫星光通信系统中反射式光学天线优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 27-28.

[9] Yu Jianjie, Li Xuanjiao, Tan Liying, et al. Off-axis optical telescope for satellite laser communicate on terminal [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(7): 1890-1895. (in Chinese)
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.

[10] Suryakant Gautam, Amit Gupta, Ganga Sharan Singh. Optical design of off-axis Cassegrain telescope using freeform surface at the secondary mirror [J]. ***Optical Engineering***, 2015, 54(2): 1-2.

[11] Meng Qingyu. Wang Hongyuan. Wang Yan, et al. Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(10): 1018002. (in Chinese)
孟庆宇, 汪洪源, 王严, 等. 大线视场自由曲面离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018002.

[12] Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Zhang Daliang, et al. Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(4): 0418004. (in Chinese)
孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418004.

[13] Zhang Lei, Liu Dong, Shi Tu, et al. Optical freeform surfaces testing technologies [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)
张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.

[14] Li Ming, Luo Xiao, Xue Donglin, et al. Design of CG fortesting large off-axis asphere by considering mapping distortion [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(5): 1246-1253. (in Chinese)
李明, 罗霄, 薛栋林, 等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1246-1253.