

## 离轴天线在卫星激光通信系统中的应用

俞建杰<sup>1,2</sup>, 李宣娇<sup>1</sup>, 谭立英<sup>1</sup>, 马晶<sup>1</sup>, 韩琦琦<sup>1</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与技术博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 现有卫星激光通信终端通常采用同轴两反天线结构, 该结构存在接收视场小、发射效率低等缺点。为消除同轴两反结构存在的固有缺陷, 提高卫星激光通信系统的瞄准和捕获效率, 研究了利用离轴三反结构提高卫星激光通信系统的性能。首先根据基本像差理论, 推导得到离轴三反光学结构的初始结构方程。利用离轴结构具有更多设计参量的优势, 对离轴三反结构进行优化设计, 给出了设计实例。计算机仿真得到的光学传递函数、点列图、衍射包围圆能量和波前误差等均表明: 离轴三反结构与同轴两反结构相比, 具有更加优异的性能, 能够满足卫星激光通信系统不断提升的性能要求。

**关键词:** 卫星激光通信; 离轴天线; 离轴三反天线; 同轴两反天线

**中图分类号:** T929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1890-06

## Off-axis optical telescope for satellite laser communication terminal

Yu Jianjie<sup>1,2</sup>, Li Xuanjiao<sup>1</sup>, Tan Liying<sup>1</sup>, Ma Jing<sup>1</sup>, Han Qiqi<sup>1</sup>

- (1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Post-doctoral Mobile Station of Instruments Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The coaxial two-mirror reflective telescope was usually used within a typical satellite laser communication terminal, which has the disadvantage of small field of view and low emission efficiency. In order to eliminate the inherent defects of the existing coaxial two-mirror reflective telescope, and improve the pointing and tracking efficiency of the satellite laser communication system, off-axis three-reflective optical telescope was designed for satellite laser communication terminal. The initial structure of the off-axis telescope was deduced according to the basic aberration theory, and the off-axis three-mirror reflective telescope with more lager field of view and higher efficiency was given. Simulation results of modulate transfer function, spot diagram, diffraction encircled energy and wavefront error all show that the off-axis three mirror reflective structure has the better performance compared with the coaxial two-mirror reflective structure, and meets the increasing design requirements of satellite laser communication system.

**Key words:** satellite laser communication; off-axis optical telescope;

off-axis three-mirror reflective telescope; coaxial two-mirror reflective telescope

收稿日期: 2012-11-07; 修订日期: 2012-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(10904026); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z10140)

作者简介: 俞建杰(1980-), 男, 博士, 主要从事卫星激光通信、信息光学、光学系统设计等方面的研究。Email: yjjhit@163.com

## 0 引言

卫星激光通信是直接利用激光在卫星与卫星间、卫星与地面间进行大容量、高速率信息传输的通信方式,目前已引起世界各国的广泛重视,成为卫星通信领域的研究热点。随着卫星激光通信系统向小型化、一体化、多功能化方向的不断发展,卫星激光通信系统的各项性能指标日趋苛刻。

光学天线作为卫星激光通信系统信号发射和接收的关键部件,其设计将直接影响整个激光通信系统的收发性能<sup>[1]</sup>。性能优良的卫星激光通信终端光学天线通常具备以下特性<sup>[2]</sup>:(1) 发射和接收效率高。卫星激光通信技术要解决的是极远距离间极弱信号的探测,而激光通信终端的各种资源又受到卫星平台的严格限制,因此要求发射和接收系统均具备很高的效率,以保证足够光能从发射端激光器传输至接收端探测器。(2) 接收视场大。卫星激光通信技术通常需要在两个相对高速运动的激光通信终端之间完成瞄准和捕获操作后才能进行有效跟踪,实现实时动态激光通信,因此要求接收终端具备较大的接收视场,以提高瞄准和捕获效率。(3) 成像质量好。尽管卫星激光通信光子系统属非成像能量接收系统,但由于接收距离极远、接收能量极弱,接收终端对入射至光电探测器上的光斑能量集中度,光斑形状和大小等方面仍然有很高要求,以满足瞄准、捕获、跟踪和通信要求。(4) 加工、装配和检测精度高。卫星激光通信终端是光机电一体化设备,涉及精密光学、空间材料、精密机械、空间光机结构、精密检测等众多高、精、尖学科和领域,其光学天线一般要求 RMS 波前误差在  $\lambda/10 \sim \lambda/30$  之间,因此要求加工、装配和检测等各阶段具备很高的精度。(5) 质量轻、结构稳固、可靠性高。考虑到发射成本、工作环境和使用寿命的特点和要求,卫星激光通信终端的光学天线需具备以上特点。

现有的卫星激光通信终端光学天线大多采用同轴两镜反射(以下简称同轴两反)型式<sup>[3-4]</sup>,该型式具有技术成熟、装调简便等优点,可以满足卫星激光通信的一般应用需求。然而,同轴两反光学天线存在以下固有缺陷<sup>[5]</sup>:(1) 存在次镜遮挡问题。在激光发射终端中,次镜遮挡造成了发射光束能量损失,尤其当发射光束能量分布为高斯分布时,次镜遮挡造成的

能量损失将进一步加大。对接收激光终端而言,次镜遮挡同样造成了能量损失,由于接收到的光场可近似认为是均匀分布,次镜造成的能量损失远小于发射终端。此外,当同轴两反镜组成无焦光学天线时,次镜遮挡的激光束将会直接返回激光终端内部,影响接收光学系统性能。(2) 接收视场较小,成像质量一般。同轴两反光学天线由主反射镜和次反射镜共同组成,根据像差理论,可用于消除像差的变化参量太少,难以校正轴外像差,接收视场较小,成像质量欠佳。

为消除同轴两反光学天线的固有缺陷,可采用离轴反射式光学天线<sup>[6-9]</sup>。离轴反射结构由于没有次镜遮挡,收发效率很高。同时,由于离轴结构具有更多设计自由度,可消除轴外像差,能实现更大视场范围的瞄准和捕获。实际上,由瑞士 Contraves 空间中心设计的 OPTEL-25 GEO 激光通信终端的光学天线即为无目镜的离焦-离轴四镜反射结构,其口径为 135 mm,放大倍率为 10 倍<sup>[10]</sup>,但其详细光学性能暂未见报道。文中同样对离轴反射式光学天线展开了研究,以实现卫星激光通信系统对收发效率和接收视场等设计指标的进一步要求。

## 1 离轴天线初始结构确定

离轴天线通常包括离轴两反、离轴三反和四反等多种结构,可直接用于卫星激光通信系统的收发光路,也可与配套目镜组组成扩束系统后实现对收发光束的控制。与离轴两反和其余离轴多反结构相比,离轴三反系统在统筹考虑消像差能力和加工装调便利性方面具有较大优势,因此,文中主要以离轴三反结构为研究对象。

离轴三反天线的初始结构可通过同轴三反结构推导得到,同轴三反系统结构如图 1 所示。假设物体

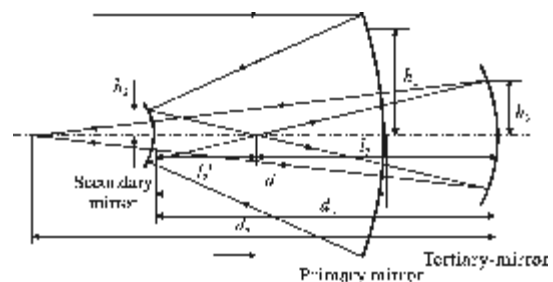


图 1 同轴三反系统结构

Fig.1 Layout of coaxial three-mirror reflective structure

位于无穷远,入瞳位于主镜上,且主次镜和三镜的二次曲面系数分别为  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$ 。另作如下定义:次镜对主镜的遮挡比  $\alpha_1=l_2/f_1' \approx h_2/h_1$ ;第三镜对次镜的遮挡比  $\alpha_2=l_3/l_2' \approx h_3/h_2$ ;次镜的放大率  $\beta_1=l_2'/l_2 \approx u_2/u_2'$ ;第三镜的放大率  $\beta_3=l_3'/l_3 \approx u_3/u_3'$ 。

由于卫星激光通信系统为激光非成像系统,需消除的单色像差一般为4种:球差、慧差、像散和场曲,相应的三级像差系数分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$ 。

根据三级像差理论,可得到以上几种像差系数的表达式<sup>[11]</sup>分别为:

$$S_1 = \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1)\beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 + e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_1)^2] \quad (1)$$

$$S_2 = -\frac{e_2^2 (\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3}{4 \beta_1 \beta_2} + \frac{e_3^2 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4 \beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2} + \frac{(\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4 \beta_1 \beta_2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4 \beta_1 \beta_2} \quad (2)$$

$$S_3 = -e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1)^3}{4 \alpha_1 \beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)^3}{4 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4 \alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1 \beta_1} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} - \beta_1 \beta_2 + \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (3)$$

$$S_4 = \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (4)$$

由以上公式可知,现在有7个变量可用于系统像差校正,即  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。由各个参数的定义来看,与系统的初始结构即轮廓尺寸有关的为  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。因此,根据消像差公式,可自由安排各个参数,自由设计轮廓尺寸,以达到设计要求。

在实际空间光学系统设计中,考虑到发射成本,光学系统的轮廓尺寸受到严格限制。实际中若以三镜间隔  $d_1$ 、 $d_2$  和后截距  $d_3$  为条件确定光学天线其余结构参量,应更能满足实际使用要求<sup>[12]</sup>。

假设三镜的表面曲率半径分别为  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$ ,由系统的光焦度  $\phi$  和消场曲条件  $S_4=0$  可得到:

$$S_4 = c_1 - c_2 + c_3 = 0$$

$$\phi = 2c_3 d_3 \phi - 2c_2 + 2c_1 + 4d_1 c_1 c_2$$

$$d_3 \phi = 1 - 2d_1 c_1 - 2d_2 c_2 + 2d_2 c_1 + 4c_1 c_2 d_1 d_2$$

进一步简化可得:

$$(4d_1^2 - 4d_1 d_2 d_3 \phi) c_1^2 + (4d_1 d_3 \phi - 2d_1 d_2 \phi - 4d_1) c_1 + (1 + d_2 \phi - 2d_3 \phi + d_3^2 \phi^2) = 0 \quad (5)$$

$$c_3 = \frac{d_2 \phi - d_3 \phi + 1 - 2d_1 c_1}{2d_2 d_3 \phi} \quad (6)$$

$$c_2 = c_1 + c_3 \quad (7)$$

当系统光焦度  $\phi$  取负值时,对应系统中间不成实像;当  $\phi$  取正值时,对应系统中间成一次实像。

离轴三反初始结构的求解可按如下过程:(1) 根据系统筒长和其余设计要求,给定系统的三镜间隔  $d_1$ 、 $d_2$ ,后截距  $d_3$  和系统光焦度  $\phi$ ;(2) 根据公式(5)~(7),求解三个反射镜的表面曲率半径  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ;(3) 由三个反射镜的曲率和间隔可以求出遮挡比  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和放大率  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ;(4) 由公式(1)~(4)求得三个反射镜的二次系数  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$ 。

在实际设计中,根据上面的方法求解系统初始结构,并以此为基础先对同轴部分进行初步像差优化,然后将优化计算中的同轴部分取为离轴,继续优化直至满足像质要求。由于离轴系统的线视场中心不在光轴上,离轴系统不会产生同轴系统的中心遮挡,收发效率很高。

## 2 设计实例

根据卫星激光通信系统的实际使用要求,确定离轴三反天线的设计指标为:(1) 视场大于  $1^\circ \times 1^\circ$ ;(2) 传递函数大于 0.3(50 lp/mm);(3) RMS 波前误差优于  $\lambda/20$ (全视场);(4) 光斑直径(含 90%能量)小于等于  $3 \times 3$  pixel。

根据以上设计要求,假定具体设计参数为:入瞳口径 100 mm;工作波段 830 nm;接收视场角大于  $1.2^\circ \times 1.2^\circ$ ;系统焦距 500 mm;像元尺寸 10  $\mu\text{m}$ 。

根据以上设计参数，分别计算同轴两反天线和离轴三反天线的初始结构参数。然后将其输入光学设计软件 ZEMAX 中进行优化，优化后的同轴两反天线和离轴三反天线结构参数分别如表 1 和表 2 所示。相应的光路图分别如图 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 telescope

Surf:Type	Radius/mm	Thickness/mm
OBJ	Standard	Infinity
1	Standard	227.253
STO	Asphere	-750.12
3	Asphere	-1 401.13
IMA	Standard	Infinity

表 2 离轴三反天线结构参数

Tab.2 Parameters of off-axis three-mirror reflective telescope

Surf:Type	Radius/mm	Thickness/mm
OBJ	Standard	Infinity
1	Standard	350.00
2	CoordBreak	0
STO	Asphere	-1 259.90
4	Asphere	-413.38
5	Asphere	-605.30
IMA	Standard	Infinity

文中设计的同轴两反天线为卡塞格林形式，最大视场 1.2°。离轴三反系统则是在同轴两反系统的设计基础上取离轴之后优化得到的，其视场是以 7° 为中心视场的 2°×2° 视场，各镜的离轴量分别为主镜（入瞳）-110 mm；次镜 -19 mm；三镜 65 mm。

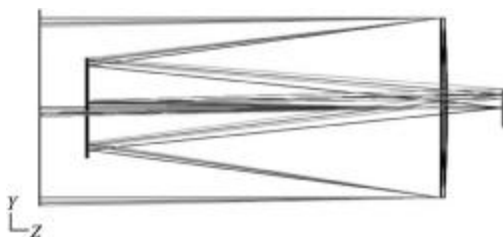


图 2 离轴两反系统结构图

Fig.2 Layout of coaxial two-mirror reflective optical telescope

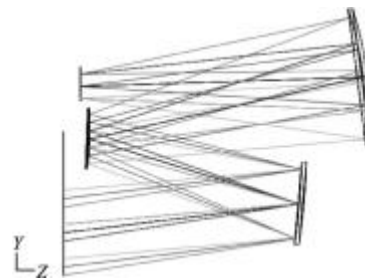


图 3 离轴三反系统结构

Fig.3 Layout of off-axis three-mirror reflective optical telescope

### 3 同轴与离轴天线性能对比

由于卫星激光通信为非成像系统，其性能主要与天线发射和接收效率、入射光束能量集中度以及波前质量等相关，对场曲和畸变要求不高。而由同轴两反和离轴三反光路结构可知，同轴两反必然会因为存在较大的能量损耗而导致天线发射和接收效率的降低，而离轴三反系统则能在理论上实现无遮挡的激光束发射和接收。

根据以上情况，综合 ZEMAX 软件的性能评价方法，针对以下几方面进行同轴两反和离轴三反天线结构的性能对比，即：调制传递函数(MTF)、点列图(SPT)、衍射包围圆能量和波前误差，图 4~图 11 分别表示了两种结构的 MTF、点列图、包围圆能量和波前误差。

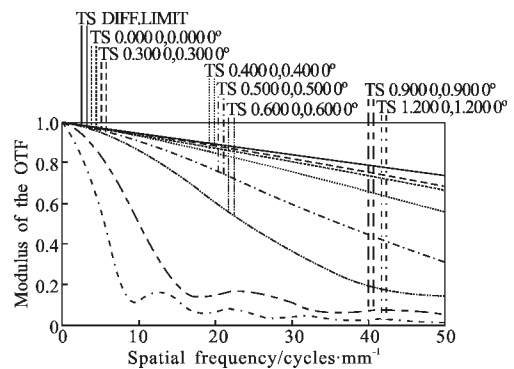


图 4 卡式同轴两反系统的 MTF 曲线图

Fig.4 MTF curves of coaxial two-mirror reflective telescope

MTF 反映的是光学系统对入射光束空间频率成分的传递能力。对比图 4 和图 5 可知：卡式两反系统的 MTF 曲线只在小视场(0.5°以内)时下降相对缓慢，比较接近衍射极限，但当视场继续增加至 1.2°×1.2°时，MTF 值快速下降，到 50 lp/mm 处时，大于 0.6°×0.6°的所有视场对应的 MTF 值不到 0.15，不满足设计要求；而离轴三反系统的 MTF 曲线在所有视

场(设计中心视场  $0^\circ \times 7^\circ$ , 最大偏转视场  $2^\circ \times 2^\circ$ )内均接近衍射极限,且在  $50 \text{ lp/mm}$  处,MTF 值始终保持在 0.7 以上,完全满足设计要求。由此可见,离轴三反系统比卡式两反系统更适合应用于大视场。

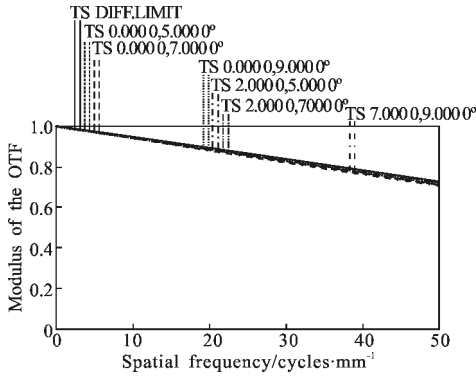


图 5 离轴三反系统的 MTF 曲线图

Fig.5 MTF curves of off-axis three-mirror reflective telescope

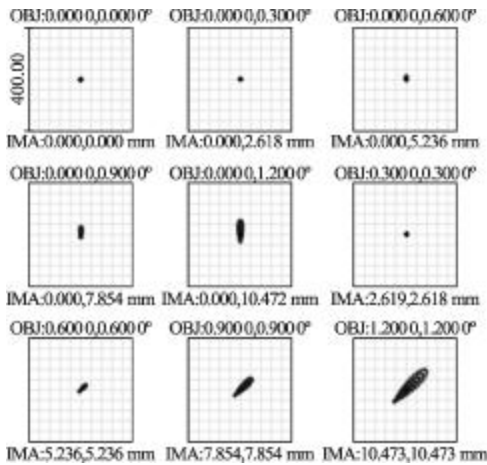


图 6 卡式同轴两反系统的点列图

Fig.6 Spot diagram of coaxial two-mirror reflective telescope

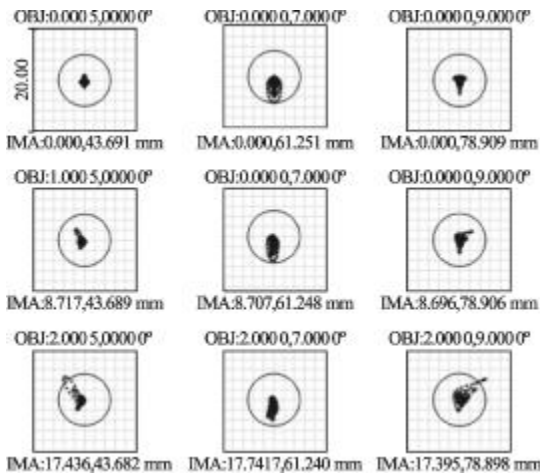


图 7 离轴三反系统的点列图

Fig.7 Spot diagram of off-axis three-mirror reflective telescope

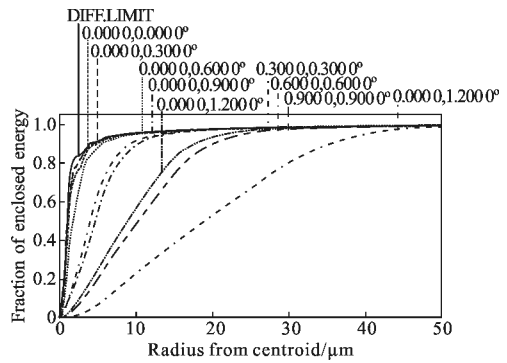


图 8 卡式同轴两反系统的包围圆能量图

Fig.8 Encircled energy of coaxial two-mirror reflective telescope

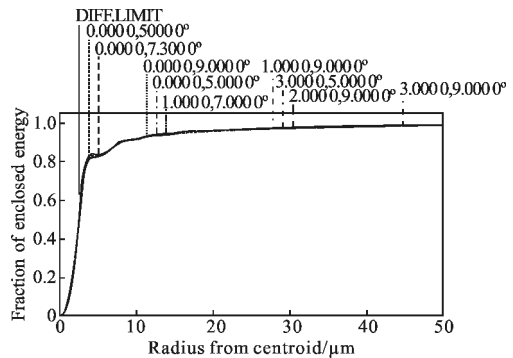


图 9 离轴三反系统的包围圆能量图

Fig.9 Encircled energy of off-axis three-mirror reflective telescope

点列图所反映的是几何光线入射至像面上的集中程度。对比图 6 和图 7 可知:由于设计的人瞳口径和焦距均相等,卡式两反和离轴三反系统的衍射艾里斑半径均为  $5 \mu\text{m}$  左右。在卡式两反系统中,当视场大于  $0^\circ \times 0.6^\circ$  时均方根半径即大于艾里斑半径。随着视场的逐渐增加,最大视场为  $1.2^\circ \times 1.2^\circ$  时成像光斑的均方根半径达到  $50 \mu\text{m}$ ,远大于艾里斑半径,不能满足设计要求。而在图 7 所示的离轴三反天线系统中,随着视场的逐渐增加,最大偏转视场  $2^\circ \times 2^\circ$  时的成像光斑的均方根半径仍小于  $2 \mu\text{m}$ ,小于艾里斑半径,这说明入射光束经过离轴三反天线后,光线密集入射至探测器上,设计接近衍射极限,满足要求。

衍射包围圆能量反映了光斑能量集中程度。由图 8 可知,当视场较小(小于  $0^\circ \times 0.6^\circ$ )时,卡式两反系统的光束能量比较集中,包围圆光斑直径满足 2~3 个像元的尺寸要求,而随着视场的逐渐增大,包围圆光斑直径迅速增大,在  $1.2^\circ \times 1.2^\circ$  视场时 90% 能量所对应的光斑直径达到了  $120 \mu\text{m}$ ,不满足设计使用要求。而由图 9 可知,随着视场的不断增大,包围圆光斑直径基本不变,最大视场  $2^\circ \times 2^\circ$  对应的 90% 能量

的光斑直径约为  $17\ \mu\text{m}$ , 完全满足使用要求。

RMS 波前误差反映的是系统波前的变化。对比图 10 和图 11 所示可知: 在卡式两反系统中, 视场较小时接近衍射极限, 最小 RMS 波前误差约为  $\lambda/23$  (相应 Y 方向视场约为  $0.3^\circ$ ), 当视场逐渐增大时, RMS 波前误差迅速变大, 至最大视场  $1.2^\circ \times 1.2^\circ$  时 RMS 波前误差大于  $0.6\lambda$ , 远远达不到设计要求。而在离轴三反系统中, 在中心视场  $7^\circ \pm 2^\circ$ , RMS 波前误差均优于  $\lambda/40$ , 满足设计要求。

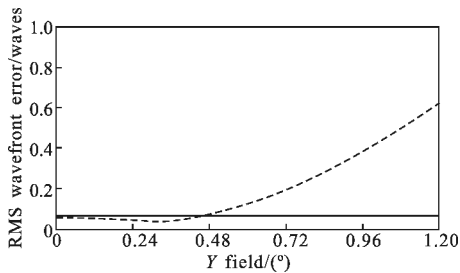


图 10 卡式同轴两反系统的均方根波前误差图

Fig.10 RMS wavefront error of coaxial two-mirror reflective telescope

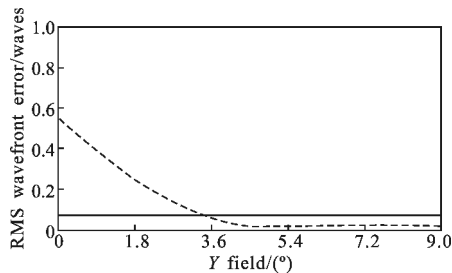


图 11 离轴三反系统的均方根波前误差图

Fig.11 RMS wavefront error of off-axis three-mirror reflective telescope

通过对以上性能的对比分析可知: 在小视场情况(视场角小于  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ )下, 除 RMS 波前误差外, 同轴卡式两反系统和离轴三反系统的其他性能均能满足设计要求; 而随着视场的继续增大, 同轴卡式两反系统的性能迅速下降以致不能满足使用要求, 而离轴三反系统则保持着稳定的光学性能, 在  $2^\circ \times 2^\circ$  视场条件下仍能达到接近衍射限的性能。

## 4 结论

文中讨论了离轴三反系统初始结构的求解方法, 给出了一种较实用的设计步骤。根据卫星激光通信系统的实际使用需求, 在相同参数条件下分别设计了同轴两反和离轴三反天线。通过 ZEMAX 光学

设计软件分析得到的 MTF、点列图、衍射包围圆能量和 RMS 波前误差等结果表明: 同轴卡式两反系统不能满足大视场光学天线设计需求, 而离轴三反系统不仅能很好地满足这些设计要求, 还具有极高的发射和接收效率, 能满足卫星激光通信系统不断提高的性能要求。随着离轴非球面加工、装配和调试技术的不断提高, 离轴三反系统必将在卫星激光通信系统中有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Tan Liying, Ma Jing. Satellite Optical Communication Technology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 6-10. (in Chinese)
- [2] Duchmann O, Planche G. How to meet intersatellite links mission requirements by an adequate optical terminal design [C]//SPIE, 1991, 1417: 30-41.
- [3] Peter Henneberg, Hermann Schubert. A new telescope concept for space communication[C]//SPIE, 1990, 1218: 153-159.
- [4] Nakagawa K, Yamamoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) [C]//SPIE. 1995, 2381: 14-25.
- [5] Zhang Yuxia, Ai Yong. Drawback of Cassegrain antenna system based on space optical communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 560-563. (in Chinese)
- [6] Korsch D. A three-mirror space telescope [J]. Opt Eng, 1975, 14(6): 533-535.
- [7] Xue Qingsheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror system for hyperspectral imager [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 942-946 (in Chinese)
- [8] Gil Moretto, Maud Langlois. Suitable off-axis space-based telescope designs [C]//SPIE, 2004, 5487: 1111-1118.
- [9] Cook L G. Compact four mirror anastigmat telescope [P]. US, 6767103 B2, 2004.
- [10] Baister G, Dreischer T, Fischer E. OPTEL family of optical terminals for space based and airborne platform communications links [C]//SPIE. 2005, 5986: 59860Z-1-59860Z-10.
- [11] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 131-134. (in Chinese)
- [12] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)