

## 空间激光通信系统离轴天线设计研究

孙权社<sup>1</sup>, 赵发财<sup>1,2</sup>, 陈坤峰<sup>1</sup>, 韩忠<sup>1</sup>

- (1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;
2. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 空间激光通信终端通常依靠光学天线提高整个通信系统的发射及接收效率。提出了一种空间激光通信系统的离轴天线系统, 以克服传统卡塞格林两镜系统存在接收视场小、发射效率低等缺点。设计了一个通光孔径为 150 mm, 放大倍率为 15 $\times$ , 满足 0.85、1.064、1.55  $\mu\text{m}$  多个通信波段光学天线系统。计算了初始结构参数, 利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光学天线系统进行了光线追迹和优化设计, 并对设计结果进行分析。分析结果表明: 在整个工作波段(0.85、1.064、1.55  $\mu\text{m}$ )内, 点列图半径几何值小于 10  $\mu\text{rad}$ , 实现了高放大倍率、宽波段像散同时校正, 在宽波段内均达到衍射极限, 满足设计指标要求, 能够满足高性能空间激光通信系统的要求。

**关键词:** 空间激光通信; 离轴天线; 光学设计; 像差

**中图分类号:** TN929.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2501-05

## Design of off-axis optical antenna for space optical communications

Sun Quanshe<sup>1</sup>, Zhao Facai<sup>1,2</sup>, Chen Kunfeng<sup>1</sup>, Han Zhong<sup>1</sup>

- (1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China;
2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Space optical communications terminals frequently rely on optical telescopes to enhance the transmitted and received efficiency of the communication system. An optical design of a space laser communications optical antenna system was proposed to overcome the traditional on-axis Cassegrain optical antenna's disadvantages of small field of view and low emission efficiency. As an example, an optical antenna system operating at 0.85  $\mu\text{m}$ , 1.064  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$  with aperture size 150 mm, magnification 15 was designed. The initial parameters were computed, and the ray tracing and optimization for the optical antenna system were performed with ZEMAX-EE software. The analysis results demonstrate that the Root Mean square (RMS) of a spot radius is less than 10  $\mu\text{rad}$  in the working wavelength(0.85  $\mu\text{m}$ , 1.064  $\mu\text{m}$ , 1.55  $\mu\text{m}$ ), which implements astigmatism correction and obtains a good diffraction-limited quality in a wide spectral region and a high magnification. These results prove the feasibility of the optical design method proposed.

**Key words:** space optical communications; off-axis optical antenna; optical design; aberrations

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国防技术基础科研项目(J312012A001)

作者简介: 孙权社(1970-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电子计量技术研究和标准研制。Email: nsqs@163.com

## 0 引言

空间激光通信技术具有容量大、速率高、体积小、质量轻、功耗低、可靠性高、保密性和安全性好等优点<sup>[1-3]</sup>,是现代超宽带卫星通信技术发展的新焦点。近年来,发达国家一直极为重视空间激光通信技术的研发,实施了一系列研究计划,取得了令人瞩目的进展。2008年3月,德国合成口径雷达卫星(TerraSAR-X)与美国近场红外实验(NFIRE)卫星成功进行了全世界第一次空间相干光通信实验,实现了数据传输速率高达5.5 Gbps的双向宽带数据传输。2013年10月,美国航天局 NASA 的月球探测器 LADEE 搭载的激光通信终端(Lunar Laser Communication Demonstration)<sup>[4]</sup>创下了在地球地面站和月球轨道探测器之间 622 Mbps 的传输数据记录。

随着空间激光高速通信技术的快速发展,对终端各分系统的性能指标要求也日趋严苛。而光学天线作为空间光通信系统信号发射和接收的关键部件,是一种精密光学系统,其设计将直接影响整个激光通信系统的收发性能。空间激光系统终端通常采用无焦光学天线系统作为前置光学系统:增加进入终端的光信号、减小出射光束的发散角、提高跟瞄机构的角分辨率等。因此,性能优良的空间激光通信终端光学天线的基本要求为:发射和接收效率高、接收视场大、放大倍率高、光学质量好、质量轻、结构稳固、可靠性高等。目前现有的空间激光通信终端光学天线大多采用卡塞格林两镜结构<sup>[5]</sup>、R-C 两镜结构。但是这类同轴两反类型光学天线存在以下固有缺陷:存在次镜遮拦,可造成超过 25% 的能量损失;接收视场较小,轴外成像质量差。为改变这种情况,可以采用离轴两镜系统<sup>[6]</sup>消除次镜遮拦问题,但视场仍然偏小,或采用 R-C 两镜带透射校正镜的方案解决有效视场偏小问题,但存在遮拦及色差问题,以及采用离轴三反式结构<sup>[7-9]</sup>,由于离轴三反结构具有更多设计自由度,可消除轴外像差,能在较大视场范围得到良好的成像质量,但是天线系统的体积显著增大,加工和装调也比较困难。针对离轴两镜无焦系统及 R-C 两镜带透射校正镜的方案缺点,为增大视场、提高像质,提出将传统卡塞格林两镜系统偏轴使用,增加单块目镜构成无焦系统。因此,文中对离轴

天线系统结构形式光学天线展开研究设计,并结合 R-C 两镜带透射校正镜方案设计进行了比较分析。

## 1 天线设计

### 1.1 设计要求

空间激光通信天线系统是一种多波段的精密光学系统,完成对通信及信标光进行发射或接收。(1) 通光口径:空间激光通信天线系统实现极远距离间微弱信号的接收探测,所以希望光学系统通光口径足够大,但又受到卫星平台资源的严格限制,因此确定的通光口径为 150 mm;(2) 视场:为了实现在两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,光学系统需具备较大的视场,提高瞄准捕获效率,分析确定视场大于  $1^\circ \times 1^\circ$ ;(3) 工作波段:天线系统可以应用于 0.8  $\mu\text{m}$ 、1.064  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$  3 个主要通信波段;(4) 光学质量:由于通信距离远、接收能量微弱,光学天线发射及接收需具备高的效率,这对光学系统的光学质量有很高的要求,光学天线的 RMS 波前误差优于  $\lambda/20$ 。确定的光学天线的主要设计指标如表 1 所示。

表 1 光学天线系统主要技术指标

Tab.1 Specification of optical antenna system

Parameter	Requirement
Clear aperture/mm	150
Field/( $^\circ$ )	$>1 \times 1$
Magnification	15
Operating wavelength/ $\mu\text{m}$	0.8, 1.064, 1.55
Aberration/RMS	$\lambda/20$

### 1.2 设计实例

离轴无焦天线系统类似于开普勒式望远镜系统,分别由传统卡塞格林两镜系统离轴后作为物镜(焦距为  $f_1$ ),再加一块单镜作为系统的目镜(焦距为  $f_2$ ),物镜和目镜共焦放置,这也可以看作是对离轴两镜无焦系统<sup>[6]</sup>的主镜复杂化得到,其中天线系统的放大倍率  $M=f_1/f_2$ 。设计时根据出射光束口径为 10 mm,视场达到  $15^\circ$ ,取目镜焦距为  $f_2=250$  mm,即可确定物镜焦距  $f_1=3750$  mm。则离轴卡塞格林两镜系统可根

据共轴两反系统理论初始数据<sup>[9-12]</sup>,再将入瞳偏离量设为 180 mm。将数据代入 ZEMAX-EE 软件<sup>[13]</sup>,经过优化和调整,离轴无焦天线系统设计结果如图 1 所示,表 2 为设计的光学天线系统的光学结构参量。

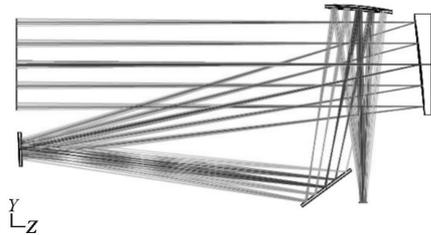


图 1 离轴天线系统结构

Fig.1 Layout of off-axis optical antenna system

表 2 天线系统光学结构参量

Tab.2 Parameters of off-axis optical antenna system

Identification	Radius	CC	Thickness
Aperture stop	Infinity	NA	740
Primary mirror	-1 738.228	-1	-730
Secondary mirror	-360.619	-2.530	593.193
Third mirror	Infinity	0	-260
Fourth mirror	500.00	-1	330
Exit stop	Infinity	NA	0

为了进行比较分析,对 R-C 两镜带透射校正镜方案同样进行了设计,由于采用透镜进行了像差的补偿校正,R-C 天线系统难以在 0.8、1.064、1.55  $\mu\text{m}$  3 个波段范围内同时满足要求,不失一般性给出了 R-C 天线系统在 0.8  $\mu\text{m}$  的设计结果如图 2 所示,表 3 为设计的光学天线系统的光学结构参量。

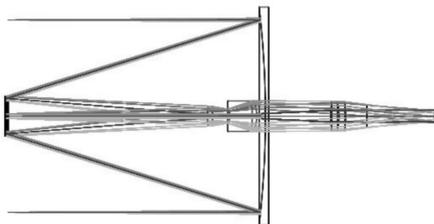


图 2 R-C 天线系统结构

Fig.2 Layout of R-C optical antenna system

表 3 R-C 天线系统光学结构参量

Tab.3 Parameters of R-C optical antenna system

Identification	Radius	CC	Material	Thickness
Aperture stop	Infinity	NA	-	244
Primary mirror	-600.000	-1	Mirror	-245
Secondary mirror	-148.750	-2.841	Mirror	189.995
Surface 1	62.589	0	N-SF6	4.85
Surface 2	-1 874.562	0	-	16.506
Surface 3	-8.803	0	BK7	25.590
Surface 4	-18.010	0	-	69.839
Surface 5	58.975	0	BK7	8
Surface 6	-40.553	0	N-SF6	6.335
Surface 7	-114.859	0	-	85
Exit stop	Infinity	NA	-	0

## 2 两种天线设计性能比较分析

由于空间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,根据以上情况,结合 ZEMAX-EE 软件的性能评价方法,主要以点列图(SPOT)、调制传递函数(MTF)、衍射包围圆能量和波前误差(WFE)作为评价指标。

几何光学中,由一点发出的许多条光线经光学系统后,由于像差的存在,使其与像面的交点不再集中于一点,而是形成一个分布在一定范围内的弥散图形,称之为点列图,因此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 3 和图 4 可知:由于设计的有效口径和放大倍率等均相等,离轴天线和 R-C 两镜系统的衍射爱里斑半径均为 104  $\mu\text{rad}$  左右。在 R-C 天线系统中,视场最大只能到 0.35°,且几何均方根半径从中心视场的 23  $\mu\text{rad}$ ,迅速下降到边缘 0.35°视场的 89  $\mu\text{rad}$ ,难以在 1°×1°视场范围内满足要求。而在离轴天线系统中,在整个视场 1°×1°时的成像光斑的几何均方根半径最大为 10  $\mu\text{rad}$ ,优于 R-C 天线中心视场的设计结果,这也远小于爱里斑半径,同时光斑形状具有很好的圆整性,对空间光通信终端进行捕获跟瞄时有重要的意义,完全满足设计要求。

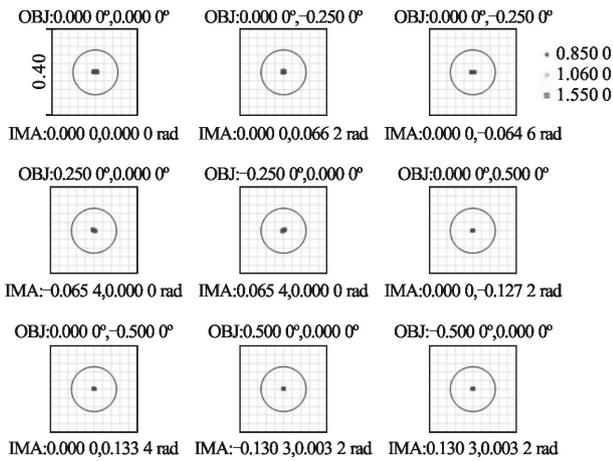


图 3 离轴天线点列图

Fig.3 Spot diagram of off-axis optical antenna

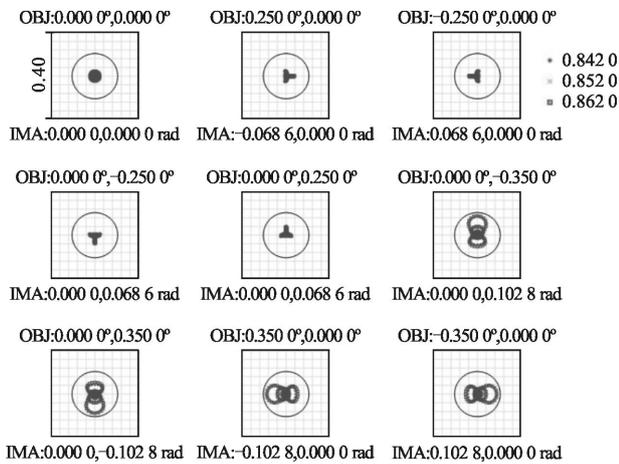


图 4 R-C 天线点列图

Fig.4 Spot diagram of R-C optical antenna

MTF 反映的是光学系统对入射光束不同空间频率成分的传递能力。对比图 5 和图 6 可知：离轴天线系统在视场  $1^\circ \times 1^\circ$  范围内达到衍射极限，而 R-C 两镜系统在视场  $0.35^\circ \times 0.35^\circ$  范围内达到衍射极限。

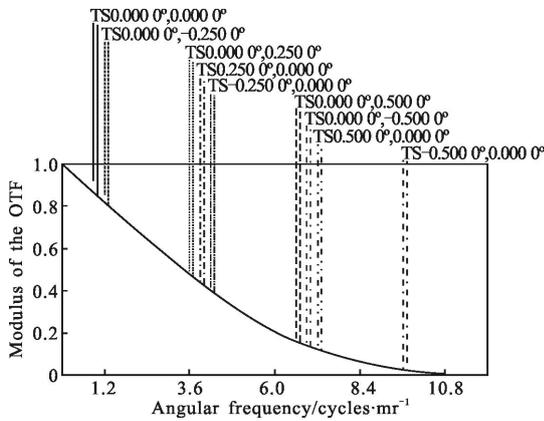


图 5 离轴天线传递函数曲线

Fig.5 MTF curves of off-axis optical antenna

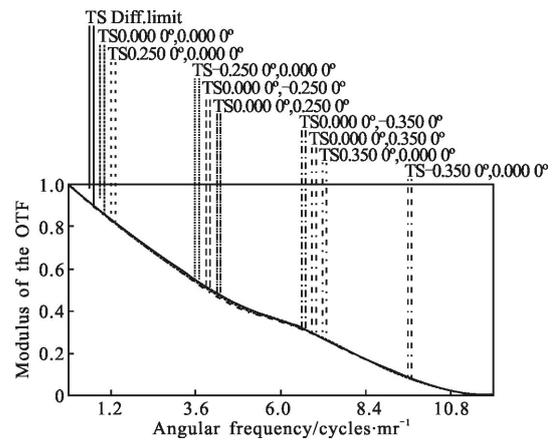


图 6 R-C 天线传递函数曲线

Fig.6 MTF curves of R-C optical antenna

衍射包围圆能量反映了光斑能量集中程度。对比图 7 和图 8 可知：离轴天线系统在视场  $1^\circ \times 1^\circ$  范围内 90% 能量所对应的光斑半径小 0.16 mrad，R-C 两镜系统在视场  $0.35^\circ \times 0.35^\circ$  范围内 90% 能量所对应的光斑半径小 0.2 mrad。

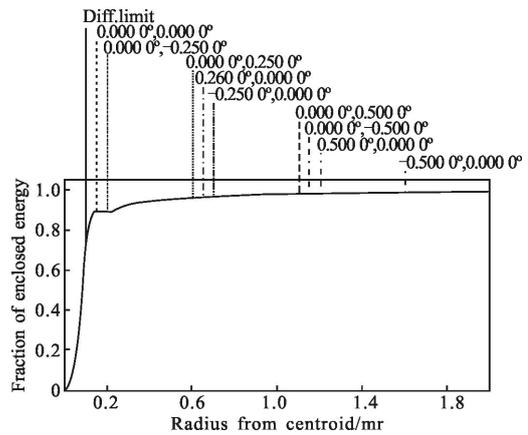


图 7 离轴天线均包围圆能量图

Fig.7 Encircled energy of off-axis optical antenna

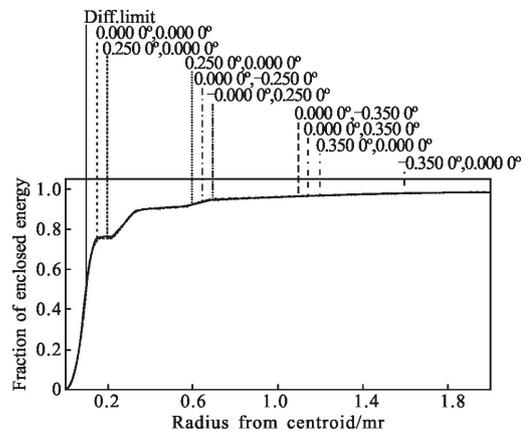


图 8 R-C 天线均包围圆能量图

Fig.8 Encircled energy of R-C optical antenna

RMS 波前误差反映的是系统波前的变化。对比图 9 和图 10 所示可知:离轴天线系统在视场  $1^\circ \times 1^\circ$  范围内波前差的均方根值小于  $0.01\lambda$ , 远小于衍射极限;而 R-C 两镜系统在视场  $0.35^\circ \times 0.35^\circ$  范围内波前差的均方根值小于  $0.025\lambda$ , 同样小于衍射极限。

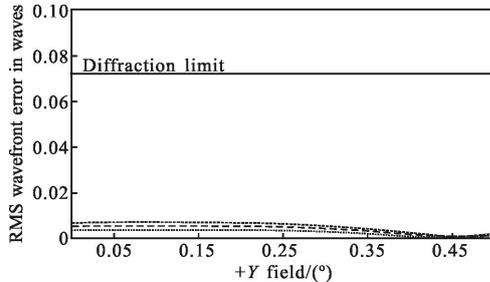


图 9 离轴天线均方根波前差

Fig.9 RMS WFE of off-axis optical antenna

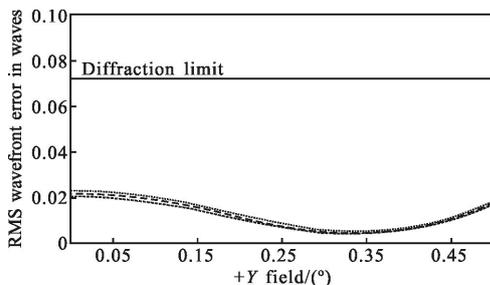


图 10 R-C 天线均方根波前差

Fig.10 RMS WFE of R-C optical antenna

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  $0.35^\circ \times 0.35^\circ$ )下,离轴天线和 R-C 两镜系统均得到了比较好的设计结果;而随着视场的继续增大,R-C 天线系统的性能迅速下降以致不能满足使用要求,而离轴天线系统则保持着稳定的光学性能,在  $1^\circ \times 1^\circ$  视场条件下仍能保持远优于衍射极限的性能,且其波段范围覆盖了  $0.85$ 、 $1.064$ 、 $1.55 \mu\text{m}$  3 个空间光通信的通信波段。

### 3 结论

为满足高性能空间激光通信系统的要求,克服传统卡塞格林两镜系统中心遮挡的缺点,提出了一种离轴天线光学系统光学设计方法。设计了一个满足  $0.85$ 、 $1.064$ 、 $1.55 \mu\text{m}$  的多波段像差同时校正的光学天线系统实例,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光学天线系统进行了光线追迹和优化设计,并结合 R-C 两镜带透射校正镜方案对设计结果进行了

分析。分析结果表明,离轴天线光学系统在整个工作波段( $0.85$ 、 $1.064$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ )内,全视场调制传递函数均达到衍射极限,实现了宽波段像差同时校正,获得了良好的成像质量,完全满足要求,同时消除了中心遮挡,有极高的发射和接收效率。结果也表明所提出的光学设计方案是可行的,随着离轴非球面加工、装配和调试技术的不断提高,为下一步在航空、航天高性能空间激光通信系统中的应用奠定了技术基础。

### 参考文献:

- [1] Karafolas N, Sodnik Z, Amengol J M P, et al. Optical communications in space[C]//ONDM, 2009: 1-6.
- [2] Brandl P, Plank T, Leitgege E. Optical wireless links in future space communications with high data rate demands [C]//IWSSC, 2009: 305-309.
- [3] Toyoshima M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(6): 300-311.
- [4] Boroson D, Robinson B, Murphy D, et al. Overview and results of the Lunar laser communication demonstration [C]//SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [5] Biswas A, Page N, Zhu D, et al. Airborne optical communications demonstrator design and preflight test results [C]//SPIE, 2005, 5712: 205-216.
- [6] Yan Peipei, Deng Xiaoguo, Zhang Henjin. Optical design of a new type space laser communication optical system [C]//SPIE, 2013, 8906: 890602.
- [7] Yu Jianjie, Li Xuanjiao, Tan Liying, et al. Off-axis optical telescope for satellite laser communication terminal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1890-1895. (in Chinese)
- [8] Pang Zhihai, Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Design of new wide-angle unobscured three-mirror optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2449-2452. (in Chinese)
- [9] Blakley R. Casarian telescope optical system [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(1): 3338-3341.
- [10] Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli, et al. The design of cassegrain optics system for double infrared wavebands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 463-465. (in Chinese)
- [11] Li Jie, Ming Jingqian, Lu Ruofei. Design of an ameliorating infrared cassegrain optical system [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 76-80. (in Chinese)
- [12] Yuan Jiannan, Fu Yuegang, Guo Jun, et al. Optimization of improved cassegrain telescope system [J]. *Journal of CUST*, 2010, 33(3): 8-10. (in Chinese)
- [13] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide[Z]. 2009: 455-514.