

离轴式共口径激光通信光学系统设计

王蕴琦^{1,2}, 刘伟奇^{1,2}, 付瀚毅², 高世杰^{1,3}, 吴佳彬³

¹中国科学院大学长春光学精密机械及物理研究所研究生部, 吉林 长春 130033

²中国科学院长春光学精密机械及物理研究所空间一部, 吉林 长春 130033

³中国科学院长春光学精密机械及物理研究所光电探测部, 吉林 长春 130033

摘要 根据激光通信及共口径技术基本原理,对共口径自由空间激光通信光学系统的参数进行了分析,并设计得到了一套离轴式共口径激光通信光学系统。系统光学天线采用离轴两反结构,有效通光口径为160 mm,光束压缩比为10:1,跟瞄系统采用无焦望远结构,最大跟踪视场为 ± 1 mrad,最佳跟踪精度为2 μ rad。利用Zemax软件对系统进行了光线追迹和性能分析,结果表明系统性能优良,波像差优于 0.1λ ($\lambda = 632.8$ nm),并且结构紧凑,公差合理,装配简单,能满足实际应用的需求,对实现中地球轨道(MEO)自由空间激光通信具有一定的工程意义。

关键词 光通信; 激光通信; 共口径; 接收和发射系统; 望远系统; 跟瞄系统

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.010602

Design of Laser Communication Optical System with Off-Axis Common Aperture

Wang Yunqi^{1,2}, Liu Weiqi^{1,2}, Fu Hanyi², Gao Shijie^{1,3}, Wu Jiabin³

¹Department of Postgraduates, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²First Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³Department of Photoelectric Detection, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract According to the basic principle of laser communication and common aperture technology, the parameters of the optical system of common aperture free space laser communication are analyzed, and an off-axis common aperture laser communication optical system is designed. With an off-axis two-mirror structure, the optical antenna of the system has an effective aperture of 160 mm and the beam compression ratio is 10:1. Tracking and pointing system adopts non-focus telescope structure. The maximum tracking field of view is ± 1 mrad, and the best tracking accuracy is 2 μ rad. Based on Zemax software, the ray tracing and performance analysis are given. The results show that the wavefront error of the system is better than 0.1λ ($\lambda = 632.8$ nm), so the performance of the system is excellent. The system is of the compact structure, the reasonable tolerance and the simple assembly. The system can meet the needs of practical application and has certain engineering significance for the realization of medium earth orbit (MEO) free space laser communication.

Key words optical communications; laser communication; common aperture; receiving and transmitting system; telescopic system; tracking and pointing system

OCIS codes 060.2605; 080.3620; 220.4830

收稿日期: 2017-08-20; 收到修改稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)、国防基础科研计划项目(B1720132001)、吉林省科技发展计划项目(20150101040JC)

作者简介: 王蕴琦(1990—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: james_wangyunqi@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光显示、空间瞄准光学系统方面的研究。

E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

1 引言

航天载荷为提高对地分辨能力,增强功能的多样性,对星地间的数据传输提出了更高的要求。在传输速率、信息容量以及抗干扰能力等方面,传统的信息传输技术已经难以满足其需求,在这种大的背景下,基于光的一些基本属性,人们开始考虑将光波应用于通信领域,自由空间激光通信技术由此诞生。自由空间激光通信技术以特定波长的激光作为通信的传输介质,与传统的通信技术相比,由于传输介质自身的特性,激光通信设备具有传输速率高、信息容量大、抗干扰能力强以及功耗低的优势^[1-3]。总而言之,自由空间激光通信技术用激光光波代替了传统的通信传输介质,将通信带入了一个新的境地。其自身特点非常符合目前通信技术的发展趋势,并有望突破传统通信技术面临的瓶颈^[4-5]。激光通信及其相关技术自出现以来就受到人们的广泛关注,越来越多地被应用于星间、星地等各种通信有更高要求的领域中。

纵观国内外已报道的激光通信的相关设计,其主要形式有两种。第一种是收发分立结构。这种结构的接收端为大口径的光学系统,发射端的口径小于接收端,为提高通信质量往往配有多个发射端,结构较为复杂,无法实现大口径的接收。第二种是收发一体的形式。这是一种共口径设计理念,利用激光通信接收系统和发射系统的特点,将天线部分合而为一,利用分光技术将共口径接收到的光分发到各个子系统。收发一体的系统中只有一套大口径光学系统,利用偏振技术实现收发分离,利用分光技术实现各个部分工作波长的分离,具有体积小、结构紧凑的优点,适用于空间载荷^[7-10]。目前,无论是点对点式的激光通信,还是多点间组网式的激光通信,共口径光学设计都是解决通信设备与主要设备间体积、质量、空间矛盾的主要方法。另外,高分辨力的空间载荷同样需要大口径的光学系统为其提高图像获取的效率,因此共口径的光学设计还可以应用到激光通信设备与高分辨力空间相机的共口径,以进

一步减轻载荷的重量和体积。

为了在实现 24000 km 距离上的中地球轨道(MEO)自由空间激光通信的同时减轻载荷的负担,根据激光通信基本原理,以及共口径技术和收发一体激光通信设备的技术特点,利用 Zemax 设计得到了一套共口径自由空间激光通信光学系统,该系统性能优良,公差合理,结构紧凑,参数指标满足应用要求,对进一步实现 24000 km 距离上的 MEO 自由空间激光通信提供了一定的参考。

2 参数分析

共口径激光通信光学系统分为 4 个支路,分别是信号光发射支路、信号光接收支路、信标光发射支路和信标光接收支路。设计过程中系统的各部分应满足以下基本原则才能保证系统设计的正确性和合理性:1) 信号光发射支路的光束发散角和接收支路的视场角要满足匹配关系;2) 信标光发射支路的光束发散角和信标光接收支路中的粗跟踪视场角要满足匹配关系;3) 粗跟踪视场需要完全覆盖精跟踪视场,事实上,精跟踪视场一般为跟踪精度的 2~3 倍;4) 4 条支路公用同一个光学天线,光学天线的视场与衍射极限需要与后面的系统满足匹配关系^[11]。

系统中信号光光源采用 1550 nm 激光器,信标光光源采用 808 nm 激光器。为保证实现 24000 km 上的自由空间激光通信,光学天线的有效通光面定为 160 mm,压缩比为 10:1。则 160 mm 口径时光学天线极限光束发散角 θ_a 为

$$\theta_a = \frac{2.44\lambda}{D} = 0.23 \text{ mrad}. \quad (1)$$

为了保证通信过程中发射终端和接收终端的对准精度,系统跟踪支路的跟踪精度应优于 $2.3 \mu\text{rad}$ 。选定精跟踪精度为 $2 \mu\text{rad}$,根据信标光接收系统的像方视场角一般为跟踪精度的 6~8 倍,且光学天线的光束压缩比为 10:1,若信标光接收支路采用放大率 $10\times$ 的无焦望远系统,可以计算得到信标光的最小光束发散角为 1.6 mrad 。系统中各子系统的具体设计参数如表 1~4,表中 NA 为数值孔径。

表 1 发射系统设计参数

Table 1 Design parameters of transmitting system

Transmitting system of signal light				Transmitting system of beacon light			
Wavelength / nm	Object NA	Divergence / mrad	Effective aperture / mm	Wavelength / nm	Object NA	Divergence / mrad	Effective aperture / mm
1550	0.28	$\pm 1 (\pm 0.06^\circ)$	16	808	0.31	$\pm 1 (\pm 0.06^\circ)$	16

表 2 光学天线设计参数

Table 2 Design parameters of optical antenna

Effective aperture /mm	Reduction ratio	Divergence for full-field /mrad
160	10:1	2 (0.12°)

表 3 信号光接收系统设计参数

Table 3 Design parameters of signal light receiving system

Wavelength /nm	Field of view /mrad	Imaging NA	Effective aperture /mm
1550	$\pm 1 (\pm 0.06^\circ)$	0.28	16

表 4 信标光接收系统设计参数

Table 4 Design parameters of beacon light receiving system

Wavelength /nm	Size of entrance pupil /mm	Tracking accuracy / μ rad	Reduction ratio	Field of view	
				Coarse tracking /mrad	Fine tracking /mrad
808	16	2	10:1	$\pm 1 (\pm 0.06^\circ)$	$\pm 0.1 (\pm 0.006^\circ)$

3 光学系统设计

3.1 共口径光学天线设计

共口径光学系统是整个系统公用的出口和入口,其工作波段为 1055 nm 和 808 nm 双波段,系统的入瞳直径为 160 mm,发射光光束发散角或接收视场角为 ± 1 mrad。共口径天线采用离轴两反的光学结构,整个天线系统的入射光和出射光均为平行光,光束压缩比为 10:1,无光焦度。图 1 为共口径光学天线系统的光路图,图中标注 160 mm 口径的器件为主镜,16 mm 口径的器件为次镜,主、次两镜均为抛物面,采用光阑离轴方式,离轴 110 mm,主镜与次镜之间镜间距为 480 mm。系统的孔径光阑(STO)与主镜重合,可获得较大的视场角,由于系统为无焦系统,出瞳可根据需要进行调节,这有利于系统布局轻量化。

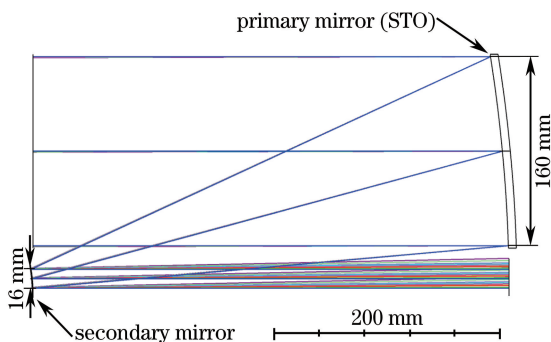


图 1 共口径光学系统光路图

Fig. 1 Optical diagram of common aperture system

该天线系统口径大、无色差、无中心遮挡且结构紧凑,性能优良。图 2 为系统全视场性能分析图,图中 OBJ 为物方像面。根据图 2(a)所示点列图可以

看出,系统 ± 1 mrad 范围内发射光光束发散角优于 0.02 mrad;根据图 2(b)所示的调制传递函数(MTF)曲线图可以看出,传递函数接近衍射极限;根据图 3(c)所示的波像差均方根值(RMS)-视场角图可以看出,系统的波像差优于 0.02λ ,可见光学天线具有良好的光学性能,能够匹配后面的子系统。

3.2 发射支路设计

激光通信系统的发射支路主要作用是将光源出射的具有一定发散角的光束压缩成小发散角的准直光,以确保光束的能量在长距离通信过程中能尽可能多地被接收系统接收,保证通信质量。一般而言,激光通信系统都包含两个发射支路,一个是信号光发射支路,该支路发射信号光,实现激光通信;另一个是信标光发射支路,该支路发射信标光,实现点到点通信时光学口径的对准。但无论是信号光发射支路,还是信标光发射支路,光线都是从光源发出,进入发射支路准直光学系统,然后经过若干光学元件,到达光学天线的入瞳,最终经过光学天线发射出去,整个过程中,对光束质量产生影响的只有准直光学系统。所以信号光和信标光发射支路的设计就是对准直光学系统的设计,在结构参数上,准直透镜组一边匹配光纤光源的数值孔径,一边匹配光学天线的入瞳尺寸,在性能参数上,其自身的光束波像差和光束发散角一定优于光学天线的波像差和光束发散角。

根据光路可逆的基本原理和反向追击光线的设计思路,利用 Zemax 光学设计软件对激光通信系统的信号光发射支路进行设计和优化,得到了信号光准直光学系统。信号光准直系统工作波长为 1550 nm,采用三片对称式结构,物方数值孔径为 0.28,总长为 31 mm。在 ± 1 mrad 范围的光束发散

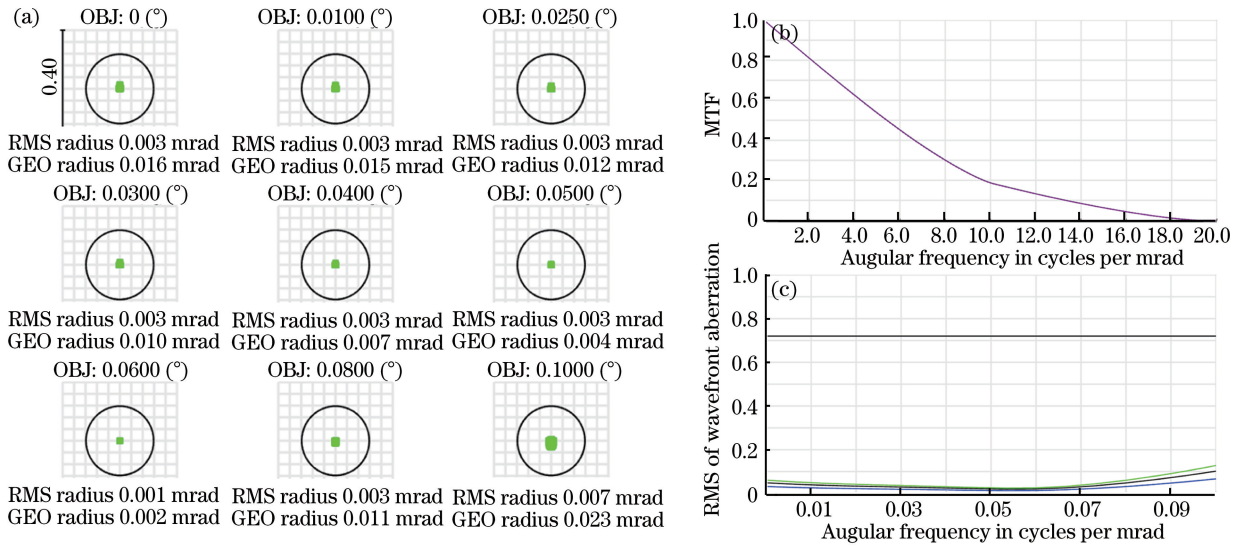


图 2 共口径系统性能分析图。(a)点列图;(b) MTF 曲线图;(c)波像差曲线图

Fig. 2 Performance analysis diagram of common aperture system. (a) Spot radius; (b) diagram of MTF curve; (c) diagram of wavefront aberration

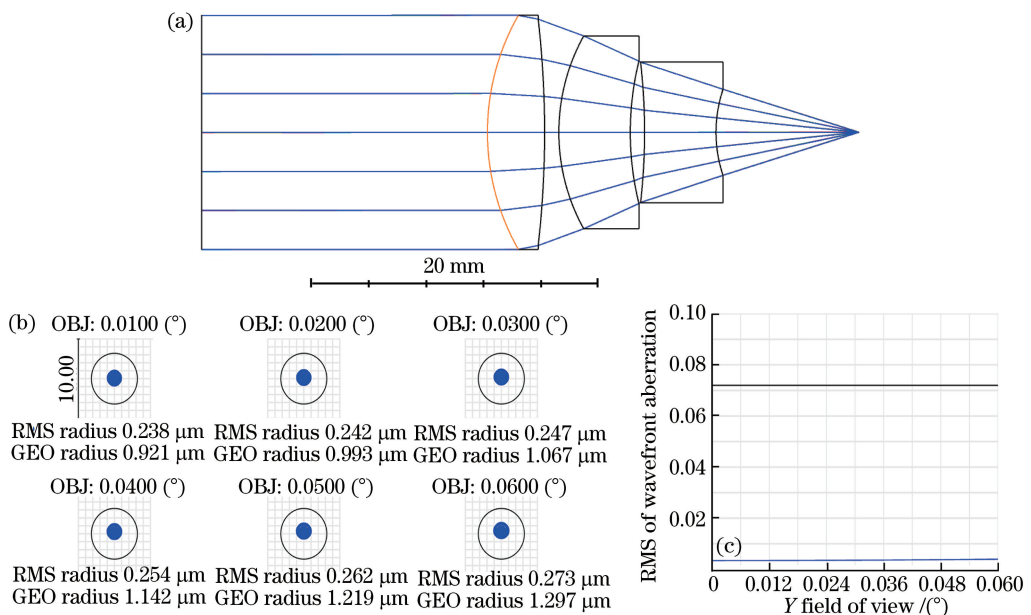


图 3 信号光发射系统光路及性能分析图。(a) 1550 nm 发射系统;(b)点列图;(c)波像差曲线图

Fig. 3 Diagram of signal light transmitting optical structure and performance analysis.

(a) 1550 nm transmitting system; (b) spot radius; (c) diagram of wavefront aberration

角内,弥散斑半径均方根值优于 $0.3 \mu\text{m}$,波像差优于 0.02λ ,图 3 为信号光系统的光路图和性能分析图。

根据相同的设计原理和思路,设计得到了的信标光(808 nm)的准直系统。系统在 $\pm 1 \text{ mrad}$ 范围的光束发散角内,弥散斑半径均方根值优于 $0.4 \mu\text{m}$,波像差优于 0.04λ ,图 4 为信标光准直系统的光路图和性能分析图。

3.3 信号光接收支路设计

本系统不再使用 CCD 捕捉信号光光斑的接收方式,而是将传输过来的信号光直接耦合进直径为 $9 \mu\text{m}$ 的单模光纤中。信号光接收支路的前端以光学天线为入口,经过聚焦耦合系统将压缩后的平行光耦合进光纤。利用 Zemax 软件优化设计得到的聚焦耦合系统焦距为 64 mm,物方数值孔径为 0.12,后截距为 25 mm,采用分离的三片式结构,光学结构图如图 5 所示。

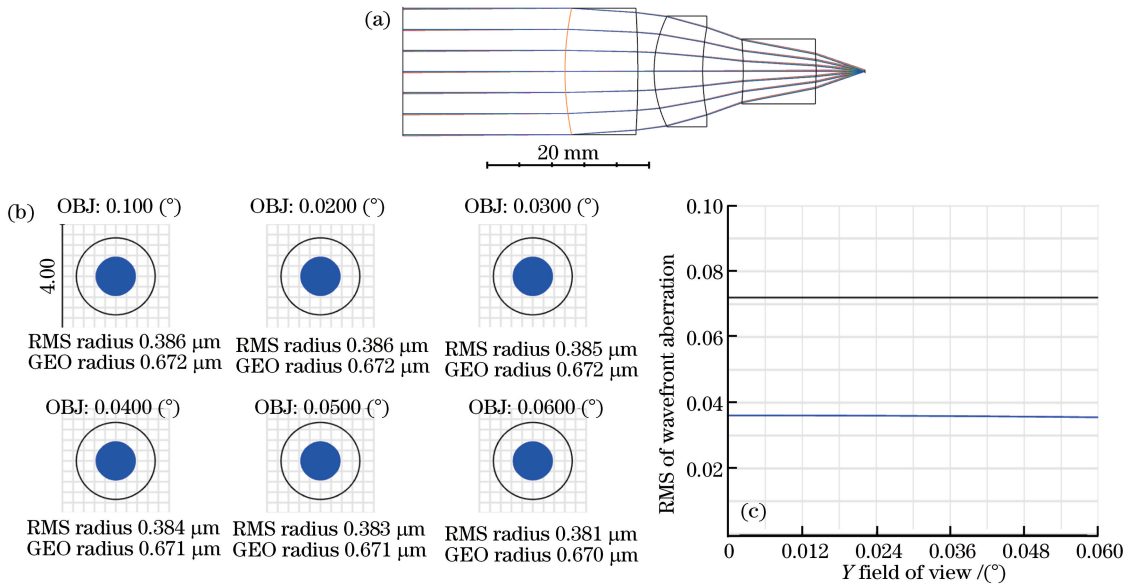


图 4 信标光发射系统光路及性能分析图。(a) 1550 nm 发射系统;(b)点列图;(c)波像差曲线图

Fig. 4 Diagram of bacon light transmitting optical structure and performance analysis. (a) 1550 nm transmitting system; (b) spot radius; (c) diagram of wavefront

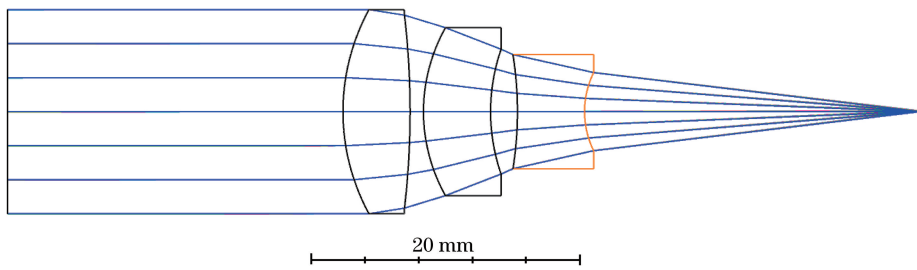


图 5 接收支路光学系统结构图

Fig. 5 Diagram of optical receiving structure

系统的性能分析图如图 6 所示。根据点列图可以得到,系统全视场(± 1 mrad)范围内弥散斑半径均方根值优于 $0.5 \mu\text{m}$,根据波像差均方根差-全视

场角的关系图可以得到波像差优于 0.02λ ,根据 MTF 曲线图可以得到系统的 MTF 曲线接近衍射极限,性能优良,满足应用需求。

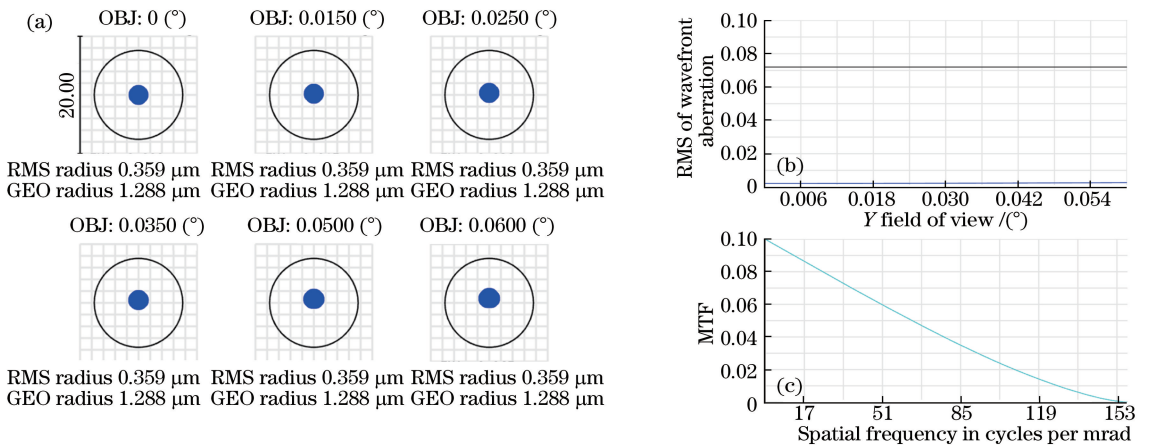


图 6 信号光接收系统性能分析图。(a)点列图;(b)波像差曲线图;(c) MTF 曲线图

Fig. 6 Performance analysis diagram of signal light receiving system. (a) Diagram of spot radius; (b) diagram of wavefront; (c) diagram of MTF

3.4 信标光接收支路设计

信标光接收支路的作用是接收信标光, 并对其定位和跟踪, 以保证激光通信点到点的对准, 因此被称为跟瞄支路。采用无焦望远结构, 入射口径为 16 mm, 出射口径为 1.6 mm, 光束压缩比为 10:1, 物镜焦距为 100 mm, 目镜焦距为 10 mm。设计得到的光学结构如图 7 所示, 图中 BS 为光束分束器。该支路由跟踪物镜和跟踪目镜两部分组成。光束经过物镜后被压缩, 然后经分光镜分为两路, 一路为粗跟踪, 一路为精跟踪, 两

跟踪支路共用物镜, 且目镜光学结构相同。粗跟踪视场为 ± 1 mrad; 精跟踪视场为 $\pm 100 \mu\text{rad}$, 完全被粗跟踪视场覆盖。

信标光系统的性能分析图如图 8 所示, 其中点列图如图 8(a) 所示, 能量集中度曲线图如图 8(b) 所示。从图 8(a) 可以看出, 落到四象限探测器上的光斑直径在 $800 \sim 820 \mu\text{m}$ 之间, 对称性良好, 满足探测器的最佳探测条件。从能量集中度曲线可以看出, 系统各视场光斑变化趋势相同, 均以平滑的趋势从中心位置向边缘位置过渡。

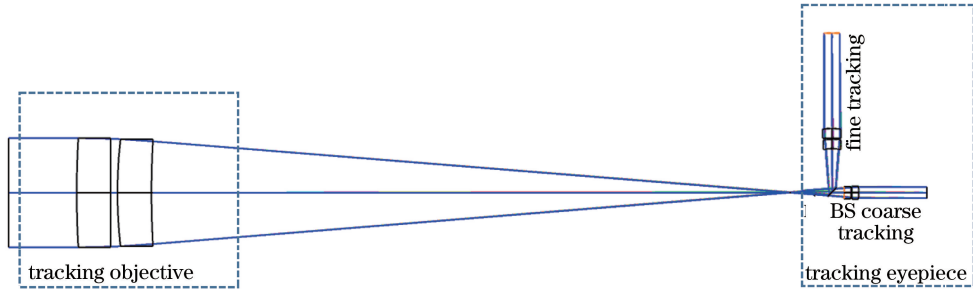


图 7 信标光接收支路结构图

Fig. 7 Diagram of bacon light receiving system

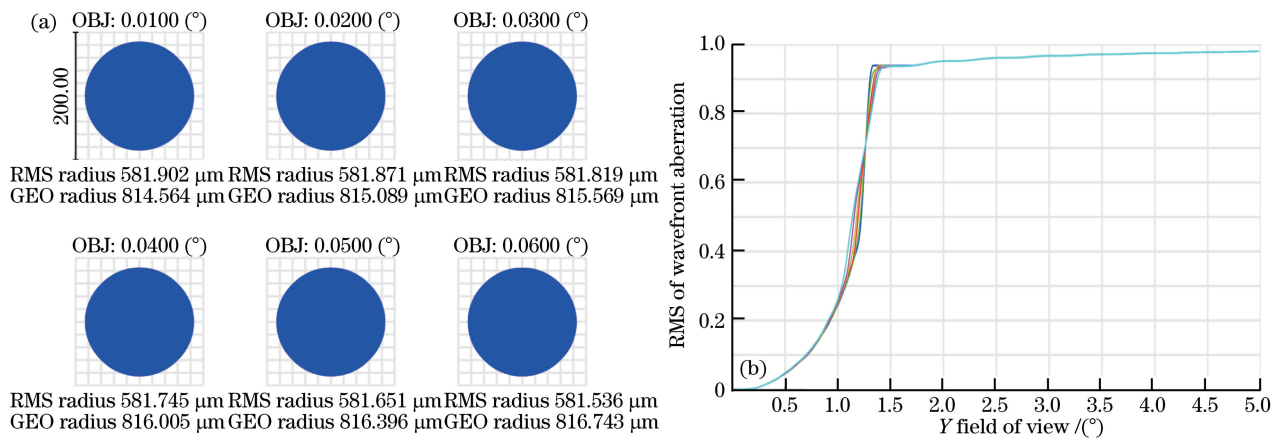


图 8 跟瞄系统性能分析图。(a)点列图;(b)能量集中度曲线图

Fig. 8 Performance analysis diagram of tracking and pointing system. (a) Spot diagram; (b) energy concentration curve

跟瞄系统后面的探测器为 InGaAs 四象限探测器, 探测器靶面大小为 $3200 \mu\text{m}$, 单个位置像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$ 。InGaAs 能够探测到其位置像元大小的 $1/10$ (即 $0.5 \mu\text{m}$) 的光斑的位置变化。由此根据公式可以计算出, 当精跟踪支路的探测器距离出瞳 600 mm 时, 即可达到 $2 \mu\text{rad}$ 的跟踪精度, 大大地缩短了系统的尺寸。

4 公差分析

利用 Zemax 软件中的容差分析功能, 采用逆灵

敏度分析方法, 以波像差下降程度为评价标准对各子系统进行公差分析。在子系统各自的工作波长下, 基于蒙特卡罗算法计算系统波像差优于 0.07λ 概率大于 90% 时的公差分配结果, 如表 5~8 所示, 表中 STO 为光阑。由此可以看出, 全套系统的公差分配合理, 工艺性良好, 具有一定的工程意义。

5 结论

为实现 24000 km 距离上的 MEO 间激光通信, 采用离轴式光学天线和无焦望远结构的信标光接收

表 5 光学天线公差

Table 5 Optical antenna tolerance analysis

Displacement	Primary mirror	Secondary mirror
Decenter X /mm	0.025	0.025
Decenter Y /mm	0.025	0.025
Decenter Z /mm	0.025	0.025
Tilted X /(")	20	60
Tilted Y /(")	20	60
Tilted Z /(")	20	60

表 6 发射系统公差

Table 6 Transmitting system tolerance analysis

Displacement	STO	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5	Surface 6
Thickness /mm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Decenter /mm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Tilted / (")	40	40	40	40	40	40

表 7 信号光接收系统公差分配表

Table 7 Signal light receiving system tolerance analysis

Displacement	STO	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5	Surface 6
Thickness /mm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Decenter /mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Tilted / (")	40	40	40	40	40	40

表 8 跟瞄系统公差分配表

Table 8 Tracking and pointing system tolerance analysis

Displacement	STO	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5	Surface 6	Surface 7	Surface 8
Thickness /mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Decenter /mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Tilted / (")	40	40	40	40	40	40	40	40

系统,设计得到了一套共口径、高跟踪精度的激光通信光学系统,系统主要由共口径天线、信号光发射准直系统、信标光发射准直系统、信号光接收系统、信标光接收系统等部分组成,其中光学天线的口径达160 mm,无中心遮拦。利用 Zemax 软件对 4 部分系统进行了光线追击和优化设计,并对其进行了性能分析和公差分析,结果表明系统结构紧凑,公差合理,精跟踪的精度可以达到 $2 \mu\text{rad}$,信号光接收系统弥散斑半径优于 $0.5 \mu\text{m}$,在 $\pm 1 \text{ mrad}$ 范围内工作波长下系统波像差优于 0.05λ ,实际检测中采用 632.8 nm 的光时,系统的波像差优于 0.1λ ,性能优良,具有一定的工程意义。

参 考 文 献

- [1] Liu B L, Zhou Z X, Li J, *et al.* Study on thermal control technology of GEO satellite-borne laser communication optical antenna [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306003.
刘百麟, 周佐新, 李健, 等. GEO 空间星载激光通信

光学天线热控技术研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306003.

- [2] Zhang Y L, Fu Q, Jiang H L, *et al.* Analysis of parameters of integrated optical system of ranging imaging and communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306001.
张雅琳, 付强, 姜会林, 等. 测距成像通信一体化光学系统参数分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306001.
- [3] Hu G J, Liu B L, Zhou Z X, *et al.* Impact analysis of solar window and its optical and thermal properties on the laser communication antenna [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0706002.
胡峒杰, 刘百麟, 周佐新, 等. 太阳窗光热特性对光通信天线热稳定性影响分析 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706002.
- [4] Jiang H L, Jiang L, Song Y S, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0405008.

- 姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [5] Sun Q D, Zhao F C, Chen K F, *et al.* Design of off-axis optical antenna for space optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2501-2505.
- 孙权杜, 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.
- [6] Boroson D, Robinson B, Murphy D, *et al.* Overview and results of the Lunar laser communication demonstration [C]. SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [7] Yan P P, Deng X G, Zhang H J. Optical design of a new type space laser communication optical system [C]. SPIE, 2013, 8906: 890602.
- [8] Song T T, Ma J, Tan L Y, *et al.* Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.
- 宋婷婷, 马晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040004.
- [9] Song T T, Ma J, Tan L Y, *et al.* Lunar laser communication demonstration in USA: Terminal design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050003.
- 宋婷婷, 马晶, 谭立英. 美国月球激光通信演示验证——终端设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050003.
- [10] Ma X P, Sun J F, Zhu Y N, *et al.* Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
- 马小平, 孙建锋, 朱亚楠, 等. DPSK 调制/自动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.
- [11] Jiang H L, Hu Y, Ding Y, *et al.* Optical principle research of space laser communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
- 姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.