

成像与激光发射系统的共口径设计与实验

李艳杰^{1,2}, 金光^{1*}, 张元¹, 孔林¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 将成像光学系统同时用作激光发射天线的共口径设计可有效减轻卫星载荷质量和应对各种突发状况。首先根据激光通信的能量计算链路, 分析了激光发射天线的设计要求, 明确了激光发射天线与成像光学系统的不同; 然后根据特定的成像光学系统给出了3种具有普适性的共口径设计方法, 并对这3种方法的性能进行了分析和比较, 给出了它们的优缺点和适用范围; 最后对所设计的共口径系统进行了发射光束仿真, 经过对设计系统加工、装调后进行了室内的成像、通信实验, 结果显示发射激光的最小束散角可达 $18.2 \mu\text{rad}$, 接近系统衍射极限, 出射光斑质量良好, 接收到的图像与成像系统所成图像肉眼观测无失配。初步证实该共口径设计可实现光学系统的成像和通信任务要求。

关键词: 共口径光学系统; 激光通信; 空间成像; 耦合镜

中图分类号: O435.2; TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150802.0220

Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting

LI Yan-jie^{1,2}, JIN Guang^{1*}, ZHANG Yuan¹, KONG Lin¹

(1. *National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: jing@ciomp.ac.cn*

Abstract: Research on co-aperture designing methods with which the space imaging optical system can be used as laser transmitting antenna is important to alleviate the load of the satellite and to deal with sudden trouble. First, space laser transmitting design request was analyzed based on the power transferring in laser communication link and the difference between imaging system and laser transmitting system was given. Then three design methods generally used for co-aperture system based on a given imaging optical system were proposed. Their performance were analyzed and compared, and their advantage, disadvantage and fitting areas were given.

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AA121502)

en. Finally, the transmitting beam of the designed co-aperture system was simulated, and the imaging and laser communicating experiment were made after system fabricating and aligning. Results show that the least divergence angle of the transmitting beam is about $18.2 \mu\text{rad}$ which is close to the system diffraction limitation. Besides the transmitting beam is of great quality and the received image is nearly same as the one obtained by the imaging system when observed with the naked eyes. It is approved that the co-aperture design can satisfy the need of space imaging and laser communicating mission well.

Key words: co-aperture optical system; laser communication; space imaging; coupling lens

1 引言

激光通信系统的低功耗和高速率使其受到越来越多的关注,特别是在空间通信领域^[1-3]。在空间激光通信中,同时提高调制速率和输出功率是通信发射单元的技术瓶颈,将光纤通信领域业已成熟的通信发射、探测技术引入空间可以克服这一瓶颈,已经成为一种发展趋势^[4-5]。空间激光通信光学系统一般采用卡塞格林系统加透镜的形式以便获得较大的通光口径,空间成像光学系统一般采用相似的结构,因此在对载荷质量严格限制的情况下,可以考虑将二者设计为共用部分光学系统的形式。此外,当发生突发状况使成像和通信光学系统有一方不能正常工作时,可以通过对另一个光学系统添加分光组件等方法进行代替工作而不影响成像和通信需求。因此将成像光学系统同时用作激光发射天线的共口径设计研究具有重要意义^[6]。目前激光通信与激光测距共用光学系统的形式已经存在^[7],其他方面的共口径应用也在逐渐发展^[8-9],并通过了可行性验证。本文考虑将成像光学系统同时用作基于 EDFA 放大的光纤光源的激光发射天线的共口径设计。

在文献[10]中我们提出一种同轴三反成像光学系统与收发合一激光通信天线共口径工作的光学系统设计结构,讨论了满足共口径的成像和通信系统设计方法。为应对激光通信光学系统的突发障碍,同时使共口径设计更有普适性,本文全面分析了将成像光学系统用作激光发射天线时的共口径设计方法。首先分析了激光发射天线的设计要求,然后提出3种将成像光学系统用作激光发射天线的共口径结构,并对这3种共口径系统

的优缺点及适用范围进行了讨论,最后对所设计的共口径系统进行发射光束仿真分析和成像、通信实验,证实了该共口径设计满足空间成像和通信的需求。

2 激光发射天线设计分析

空间激光通信链路可以简单描述成:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_t \cdot G_r \cdot \eta_r \cdot \eta_s \quad (1)$$

式中, P_r 为探测器接收的信号功率; P_t 为发射信号功率; G_t 为发射光学天线增益, $G_t = \left(\frac{2\pi\omega}{\lambda}\right)^2$, ω 指出射高斯光束的束腰; η_t 为发射光学单元效率; G_r 为接收光学单元的增益; η_r 为接收光学单元效率; η_s 为信道传输损失。为提高探测器接收到的信号功率需要最大限度地提高天线增益和发射、接收光学单元效率。

对于高斯光束束腰是从提高发射光学天线增益的角度出发,将压缩输出光束的束散角作为主要技术途径,但是压缩光束的束散角将受到动态跟踪误差的限制。因受到光斑检测、跟踪带宽等因素限制,通信系统的对准跟踪精度不能无限提高。若跟踪精度已经达到某个极限,则它将对一个最佳的通信束散角。

像差对激光发射天线有较大影响^[11-12],它引起的波前畸变损失是影响发射光学单元效率的因素之一。近轴光学系统由畸变引起的光强损失近似表达式为:

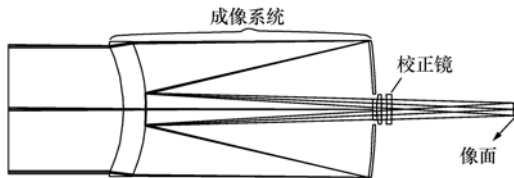
$$\eta_t = \exp[-(k\sigma)^2] \quad (2)$$

式中, σ 为系统波面误差。对大多数空间激光通信系统,通常要求激光发射单元的波面误差小于 $\lambda/10$ ^[13-14]。

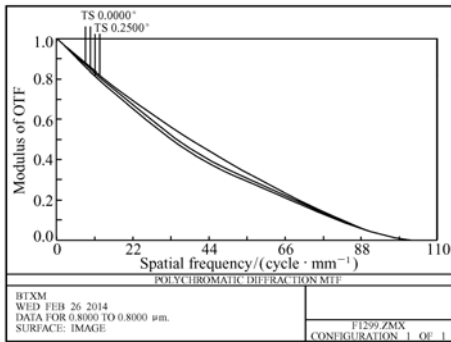
综上所述,输出光束的束散角、光学系统波前畸变、系统透过率是激光发射光学系统的主要技术指标,设计空间激光发射系统前需综合考虑通信链路损耗、跟踪精度等总体技术指标。

3 共口径结构讨论

将空间成像光学系统用于激光发射的共口径设计形式多种多样,以某一成像系统为例,光学系统结构为马卡系统加补偿透镜的形式,如图 1 所示,基于此成像系统本文设计了 3 种共口径应用形式,并对此 3 种共口径形式的性能进行了分析。



(a) 系统结构
(a) Configuration of system



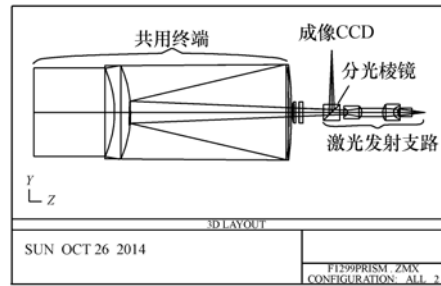
(b) 系统 MTF
(b) MTF of system

图 1 原成像光学系统

Fig. 1 Origin imaging optical system

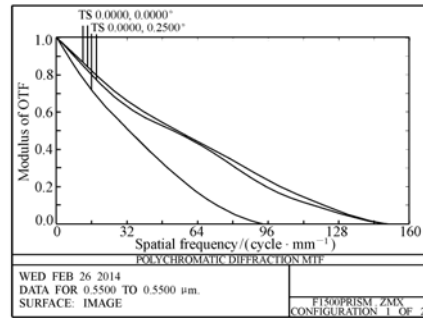
3.1 棱镜分光式

通过在棱镜分光面镀膜将成像光学系统和激光发射光路分开,然后设计耦合光学组件使激光发射性能最优,见图 2(a)。对成像系统来说,棱镜处在汇聚光路中,因此会引入像散,见图 2(b),需要在成像后续光路部分添加消像散光学组件。此外,因为光束入射到分光棱镜分光膜的角度在 45°左右,当通信光路采用 1 550 nm 波长而成像波段为可见光时,对分光膜的镀膜工艺提出了较高的要求。



(a) 棱镜分光式共口径光学系统结构

(a) Configuration of co-aperture optical system based on prism



(b) 成像系统 MTF

(b) MTF of imaging system

图 2 棱镜分光式共口径系统

Fig. 2 Co-aperture optical system based on prism

3.2 分色片分光式

采用分色片将成像光学系统和激光发射光路分开,然后设计耦合光学组件使激光发射性能最优,见图 3。其中分光片前表面反射可见光,透射通信光,这样对成像光学系统性能没有影响,对激光发射系统,分色片相当于倾斜平板,可通过耦合镜头的优化设计来弥补该分色片对出射光束性能的影响。

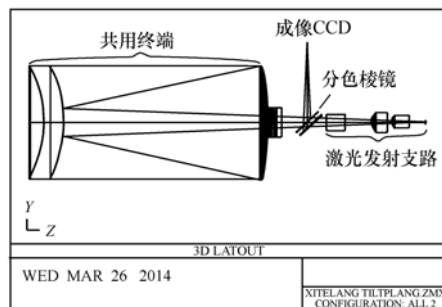


图 3 分色片分光式共口径系统

Fig. 3 Co-aperture optical system based on dichroism plane

与棱镜分光相似,该分光结构对镀膜工艺提出了较高的要求。此外,倾斜的分色片对系统的装调提出了一定的要求。

3.3 可移除反射镜分光式

该共口径系统采用机械可移除反射镜的形

式。反射镜由底部的升降台支撑,通过控制升降台来控制反射镜在光路中的位置,当反射镜如图4(a)所示时,系统进行成像工作,当移除反射镜时,系统作为激光发射天线工作,如图4(b)。

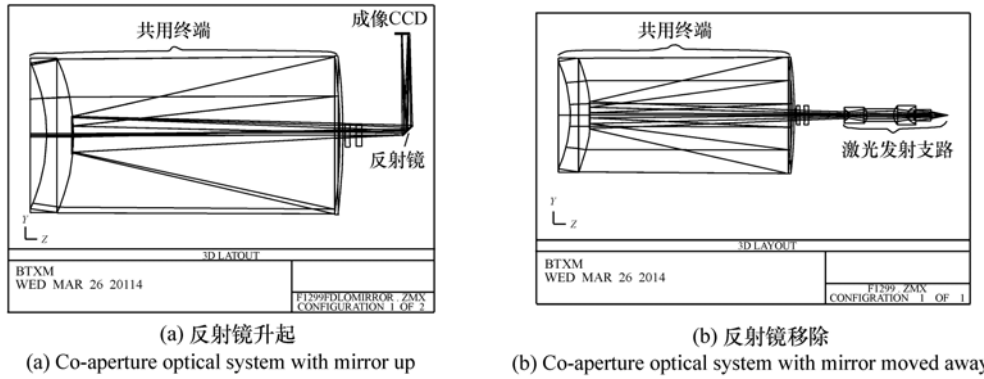


图4 可移除反射镜分光

Fig. 4 Co-aperture optical system based on flexible mirror

对3种设计形式的优缺点及适用领域进行比较,见表1。

表1 3种设计方式比较

Tab. 1 Comparing of the three design methods for co-aperture optical system

序号	设计方式	优点	缺点	适用领域
1	棱镜分光式	设计、装调简单	对分光膜要求高;需对成像系统加校正镜	成像、通信同时工作
2	分色片分光式	设计简单	对分光膜要求高;装调困难	成像、通信同时工作
3	可移除反射镜分光式	对成像和通信均无影响	机械结构要求高	成像和通信非同时工作

综合分析以上设计方式发现无论采用哪种设计,在利用成像光学系统进行激光发射时均需要设计耦合光学组件,使出射激光光源与成像光学系统相匹配。

4 共口径系统成像与通信仿真与实验

为验证共口径设计对成像和激光发射的影响,首先按第3节的第3种方法对现有成像系统(系统参数如表2所示)进行了改进设计,即在成像光学系统后方添加了可移除反射镜,设计了使光纤准直器与成像光学系统相匹配的耦合镜。共口径光学系统结构如图4(a)、(b)所示。接着对该共口径系统的光束发射特征进行了仿真分析。最后通过对该共口径系统加工及装调完成了该系

统的成像和通信实验。

表2 成像光学系统(共用终端)参数

Tab. 2 Parameters of the imaging optical system (co-aperture part)

光学系统参数	值
D	110 mm
全视场	0.5°
焦距 f	1 299 mm
次镜遮拦比	0.2

4.1 仿真

从设计原理可知,成像质量不会有损失。使用ZEMAX对共口径系统发射光束仿真,结果如图5所示:光斑质量良好;出射光束透过率为0.55;出射束散角(半角)为 $18.2 \mu\text{rad}$,接近

110 mm口径光学系统的衍射极限。

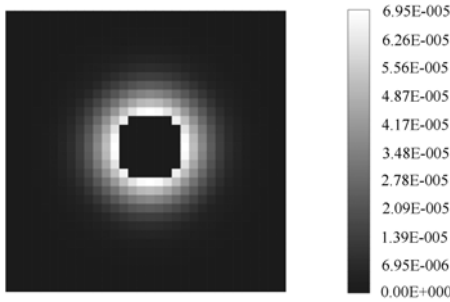


图 5 激光发射光束能量分布

Fig. 5 Energy distribution of transmitting laser

4.2 实验

受实验条件的限制,研究人员进行了室内成像通信实验来初步验证共口径设计的可行性。通信部分采用工作波长 1 550 nm 的光端机进行电光/光电转换。在激光发射端,信号光由光端机输出后经 EDFA 功率放大,功率约为 22 mW,接收端采用接收系统将光耦合进光纤,然后与光端机相连进行光信号的探测。实验流程、实验装置如图 6、图 7 所示。

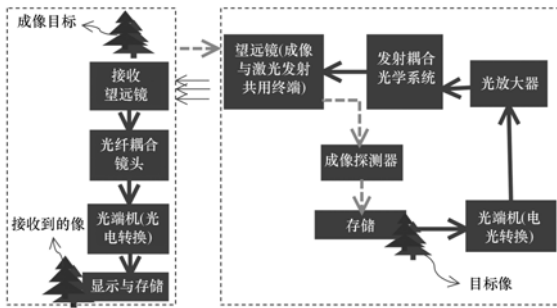


图 6 实验流程图

Fig. 6 Experiment procedure

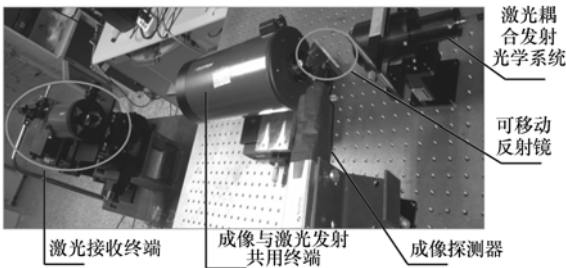


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experiment equipment

实验中先在共口径系统后方添加反射镜使之具备成像功能,对图 8(a)靶标成像,所成像如图 8(b)所示,然后移除反射镜,开启激光通信电源,发射、接收端对准后接收到的图像如图 8(c)所示。实验结果显示,所成图像 8(b)符合成像光学系统的性能指标,图 8(b)和图 8(c)二者几乎没有差别,无明显噪点等出现,显示通信系统工作正常。该实验初步验证了共口径设计的可行性。

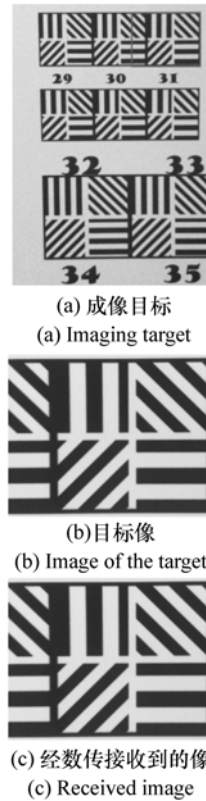


图 8 成像与通信

Fig. 8 Imaging and communication of the co-aperture system

5 结论

本文给出了 3 种将成像系统用作激光发射天线时可采用的设计结构,并对各自的优缺点及使用范围进行了比较,对可移除反射镜式共口径光学系统的应用可行性进行了仿真及实验验证。结果显示发射激光的最小束散角可达 18.2 μrad ,接近系统衍射极限,出射光斑质量良好,接收到的图像与成像系统所成图像肉眼观测无失配,该结果

表明,将成像光学系统用作激光发射天线的共口径设计可以满足空间遥感成像与数据激光传输需求。随着对小卫星技术的发展,共口径设计必将成为减少载荷质量和体积的有效手段,本文给出的3种共口径设计结构虽基于某一特定形式的光

学系统给出,却具有普遍适用性,可根据不同的需求择一使用。在以后的工作中,通信质量的验证和捕获对准跟踪系统的设计是研究共口径系统的一个重点。

参考文献:

- [1] HENNIGER H, WILFERT O. An introduction to free-space optical communications[J]. *Radioengineering*, 2010, 19(2): 203-212.
- [2] SUN X L, SKILLMAN D R, HOFFMAN E D. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1865-1871.
- [3] 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
JIANG H L. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 佟首峰, 姜会林, 张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 9(4): 649-654.
TONG S F, JIANG H L, ZHANG L Z. High data-rate space laser communication system and its application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 649-654. (in Chinese)
- [5] 向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术[D]. 电子科技大学, 2007.
XAIING J S. Fiber coupled and optically preamplified satellite-to-ground bidirectional laser communication systems and its key technologies[D]. University of Electronic Science and Technology of China. 2007. (in Chinese)
- [6] 王建立, 刘欣悦. 智能光学的概念及发展[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 437-448.
WANG J L, LIU X Y. Concept and development of smart optics[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 437-448. (in Chinese)
- [7] HEMMATI H, BIRNBAUM K. M, FARR W H, et al. Combined laser-communications and laser-ranging transponder for Moon and Mars[J]. *SPIE*, 2009, 7199(0N): 1-12.
- [8] COMAN C I, LAGER I E, LIGTHART L P. The design of shared aperture antennas consisting of differently sized elements[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2006, 54: 376-383.
- [9] WIN Y C, ERIC J S, THOMAS A F. Unique shared-aperture display with head or target tracking[J]. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality*, 2002.
- [10] 金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, et al. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
- [11] 杨玉强. 波前畸变对星间激光通信链路性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
YU Y Q. Research on the influence of wave-front aberration on intersatellite laser link performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [12] 俞建杰. 卫星光通信光学系统优化设计及性能评测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
YU J J. Research on the optimal design and performance evaluation methods of the optical system in intersatellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 670-680.
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
- [14] 刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 38-43.
LIU H ZH, JI Y F, LIU L R. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 38-43. (in Chinese)

作者简介:



李艳杰(1988—),女,山东济宁人,博士研究生,2010年于山东大学获得学士学位,主要从事光学系统设计、激光通信等方面的研究。E-mail: liyanjiework@126.com



张元(1985—),男,吉林省吉林市人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学系统设计及检测的研究工作。E-mail: zhangyuanfresh@126.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间卫星与有效载荷总体设计方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



孔林(1986—),男,安徽六安人,博士,助理研究员,2009年于中国科学技术大学取得学士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航天器热控制技术方面的研究。E-mail: konglin@mail.ustc.edu.cn