

空间链路模拟器的连续变焦光学设计

田媛^{1,2} 颜昌翔¹¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现对激光通信系统终端的实验室性能检测,需在实验室中采用光学方法模拟空间不同距离的激光传输。根据前置傅里叶变换镜的参数,提取了链路衰减系统的初级设计指标,并根据指标要求巧妙利用了光学放大、变焦系统级联的思想,实现可变距离的空间链路过程模拟;利用ZEMAX光学软件设计了单级3~10倍连续变焦的模拟系统,给出了单级放大率和变焦系统之间的曲线。单级系统总长309 mm,结构紧凑,全视场波像差优于 0.05λ ,光线能量集中。通过理论分析,四级级联可实现等效为 $10^3\sim 10^5$ km的传输距离,从而满足大多数激光通信终端的检测要求。

关键词 光学设计;空间链路模拟器;连续变焦光学系统;激光通信

中图分类号 TH74; TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.102202

Design of Optical Zoom System for Space Link Simulator

Tian Yuan^{1,2} Yan Changxiang¹¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To achieve the laboratory performance test to laser communication system terminal, an optical method to simulate the laser transmission in different distances is required to use in the laboratory. In this paper, the primary design index of a link attenuation system is extracted according to the parameters of the front Fourier-transform lens. This paper cleverly makes use of the thoughts of optical enlargement and cascaded zoom system according to the index. The simulation to space links with variable distances is realized. A simulator system which can realize 3~10 times continuous zooming of a single-stage is designed, optimized by using ZEMAX, and the zoom curve of a single-stage is drawn. The structure of single-stage system with length of 309 mm is compact. The wavefront aberration of the whole field is better than 0.05λ . The energy of light is concentrated. Through theoretical analysis, four cascaded design can achieve equivalent transmission distance of $10^3\sim 10^5$ km, so as to satisfy the detection requirements for most of the laser communication terminals.

Key words optical design; space link simulator; optical zoom system; laser communication

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 140.4480

1 引言

激光通信系统是以激光作为信号的载体,通过对激光脉冲的调制来传输信息,实现信息交换。近年来,由于激光通信系统光学增益大、波束发散角小、抗干扰和抗截获性强、功耗低、信息传递容量大和速率高等优点,激光空间链路技术已成为国内外的一大研究热点^[1]。空间激光链路作为高性能卫星通信技术中的关键性课题,国际上开展了大量的研究工作,我国也正在大力发展相关技术的研究和空间激光通信实验装置的开发。在通信终端设计和研制阶段,就必须对链路系统的性能进行检测,从而确定系统或者线路的一些

收稿日期: 2014-04-24; 收到修改稿日期: 2014-05-05; 网络出版日期: 2014-09-09

基金项目: 国家863计划(2011AA12A103)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 田媛(1989—),女,硕士研究生,主要从事精密仪器光学设计和误差分析等方面的研究。

E-mail: tiany0320@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

性能参数,包括通信距离,通信误码大小等,以便对系统进行进一步优化调试。

实验室在研制的双焦距激光准直光管就是一套用于激光通信终端性能检测的实验室设备。为了能够合理模拟相干通信光束在空间中的传输过程,在设备终端的接收装置,设计可变距离的空间链路衰减系统,从而真实模拟空间环境中激光在卫星间传递的信息。可变衰减包含可变和衰减两层意思,可变,就是为了模拟不同距离,从而使得该实验室装置可以应用于不同的激光通信终端;衰减就是模拟空间激光能量传输后的大小情况。

目前国际上日本采用了 17.5 m 的长焦距平行光管来实现较远距离的光束传输模拟,最长传输距离达 50 km^[2]。国内中国科学院上海光学精密机械研究所对星间激光通信终端的地面检测和实验室模拟也做了很多工作,根据比例化压缩原理设计了光眼瞄检验平台,实现数万千米的远距离光束传播模拟^[3]。本文利用连续变焦镜头级联进行光学成像放大,模拟激光在空间的远距离传输,设计了 3~10 倍的连续变焦的光学系统,并通过四级级联实现了最远 10⁵ km 的激光传输模拟,满足设计指标。

2 原理和设计指标

2.1 原理

链路模拟的主要目的是对不同传输距离的激光进行传输过程模拟,其测试和标定的准确性直接关系到通信终端的性能标定。空间激光通信的激光传输从发射端到接收端,距离为几百千米到几万千米,属于远场衍射,其光场分布是夫琅禾费衍射,如图 1(a)所示。而在地面实验室模拟中,从发射端到接收终端的距离只有几米左右,属于光学近场衍射^[4]。可以利用距离比例压缩的原理对实际空间的远距离激光通信进行地面实验室模拟,将传播距离和接收孔径都等效的按比例缩小,如图 1(b)所示。由于通信终端发射的基本上可认为是平行光,因此为了模拟距离首先必须采用透镜对该平行光束进行聚焦,进而进行放大实现链路模拟,根据文献[5]中的方法,单级放大一般并不能满足几千米甚至几万千米的传输过程,因此可以采用级联的形式进行设计。

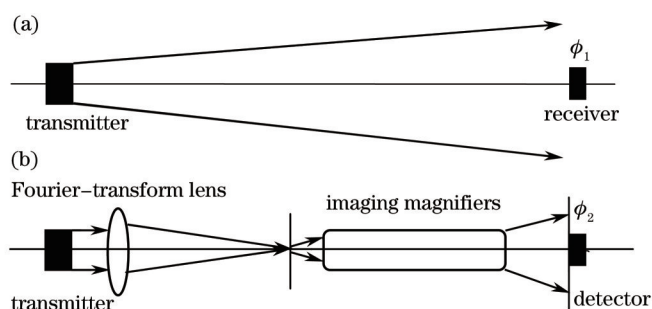


图 1 空间激光远距离传输模拟原理图。(a) 空间实际传输过程; (b) 模拟传输过程

Fig.1 Principles of space link simulator. (a) Actual transmission in space; (b) simulation of transmission

实验室模拟等效传输距离为

$$z_e = \beta \phi_1 / \phi_2, \quad (1)$$

式中 f 为傅里叶变换透镜的焦距; β 为光学放大系统的放大率; ϕ_1 为实际的星间激光通信终端的接收口径; ϕ_2 为地面模拟装置的采样口径^[5]。

2.2 主要指标要求

由于大多数星间激光通信的传播距离都达数万千米,若仅采用平行光管进行远距离传输模拟,对空间距离等要求很高,实验系统占地面积大,实验不易进行,所以考虑采用光学放大的方法,缩短系统长度;若使系统可以满足不同距离的模拟实验,传统方法需要增加或减少光学放大镜组,这对实验系统机械控制要求很高,因此考虑设计连续放大光学系统,放大倍率连续可调,机械控制结构简单;另外系统要同时满足多波长激光的传输,使其应用范围更广。根据以上分析,采取设计可变链路模拟系统,其核心理论就是用有限距离的光学放大方法模拟远程光束传播过程,采用物像关系级联,每一级光学、机械结构、控制系统都相同。其中链路衰减器的物面即为一口径 500 mm,焦距 20 m 的前置傅里叶透镜的像面。在这个像面位置设置一个孔状通光小口来约束光束孔径大小,使光束进入后置的放大光路中。设计中采用四级级联的形式,单级放大率 3~10 倍,每级的

像面都用孔径 ϕ 为 0.5~1 mm 的小孔进行约束。空间激光通信终端接收的口径一般在 250 mm 左右,经过四级级联放大,根据(1)式可以确定,理想条件下,实验室模拟的等效传输距离为 $10^3 \sim 10^5$ km。

光学放大系统单级放大指标如表 1 所示。

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

Parameter	Value
Wavelength/nm	800、1064、1550
Single-stage objective laser power	2 W
Object plane size	0.4~25 mm (divergence angle 20 μ rad ~1 mrad)
Object space aperture	50 μ m -1 mm
Object space NA	0.025
Single-stage magnification	3~10 times
Single-stage transmittance	> 0.9 (0.8~1.6 μ m)
Single-stage wavefront aberration of centroid	$\leq 0.05 \lambda$
Four-stage wavefront aberration of centroid	$\leq 0.1 \lambda$
Four-stage magnification	81~10000 times

2.3 结构形式选取

根据设计指标,设计连续变焦光学系统来实现从物到像的放大关系。光学系统焦距的连续变化,取决于各组元透镜间隔的连续变化,换言之,取决于各组元透镜的连续移动。

根据像面补偿方式的不同,变焦距镜头可分为光学补偿和机械补偿两大类。光学补偿是通过两组或三组透镜作相关的线性移动实现变焦,像面不能完全补偿,且结构尺寸较大,只能做低变倍比、小相对孔径的变焦距镜头^[6];机械补偿是通过变倍组的移动使焦距连续变化,补偿组的移动实现像面的完全补偿,使像面在连续变焦过程中保持稳定。两组元的移动是用凸轮实现的非相关移动^[7]。

变焦镜头的设计方法主要有两种。第一种是根据设计指标推导变焦系统的各个参数,以完成设计。第二种方法是通过设计指标查找现有的专利等,得到与要求相近的初始结构,并在此基础上进行修改和加工,以满足设计要求。与第一种需要繁琐计算的求解方法相比,第二种方法可以在现有资料基础上进行设计,辅以计算机软件等,设计周期大大缩短^[8]。

3 光学设计与结果分析

3.1 单级变焦系统设计

3.1.1 设计结果

设计中采用第二种方法,通过查找相关的资料和专利,选用 Zebase 镜头库中的一款投影镜头为初始结构,根据设计指标进行修改和优化,先确定长焦的系统结构,之后再行变焦设计,变焦过程中,系统物面和像面都保持不动。镜头变焦方式可分为正组补偿和负组补偿,在通常的变倍比情况下,负组补偿比正组补偿更有利于小型化^[9],所以选择了负组补偿的初始结构。

优化过程中,先将各镜组间隔设为变量,初步确定各组件之间长焦、短焦位置的间隔。再将透镜各面的曲率半径,各透镜的厚度、透镜间隔,玻璃材料设为变量,进行整个系统的优化。优化过程中,要将系统总长,系统各变焦位置的焦距、横向放大率和透镜的最大中心厚度及最小边缘厚度等设为优化的约束条件,可均匀选择多个变焦位置进行优化和像差校正。在像差校正过程中,需要注意玻璃边缘厚度和中心厚度的结果以及空气间隔的大小,并使像差满足设计要求。

单级设计光学系统优化结果如图 2 所示,其中 1 为变倍组,2 为补偿组,3 为固定组。系统物面和像面间总长为固定值 309 mm,后工作距离为 56.455 mm,满足联级时的加工要求。

3.1.2 变倍曲线

在机械补偿变焦系统中,变倍组和补偿组的移动是通过凸轮来精密控制,系统的像面稳定性和清晰度直接受到运动组元的移动影响,只有稳定的按照设计曲线移动才能得到较好像质^[10]。这里通过曲线拟合的方式,来获得系统的变倍曲线,具体是在优化好的两个倍率位置中加入新的中间倍率位置,优化出变倍组以及补偿组的位置,反复多次这样的操作,得到足够拟合出变倍曲线的各组位置参数。最后利用 MATLAB 软

件绘出变焦组、补偿组分别相对物面的距离与系统放大倍数的函数曲线,如图3所示。从图中可以看出曲线比较平滑,无明显拐点,可以加工。

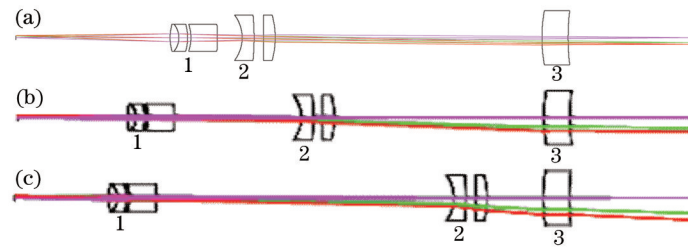


图2 连续变焦系统图。(a) 3倍; (b) 6.5倍; (c) 10倍

Fig.2 Zoom systems. (a) 3 times; (b) 6.5 times; (c) 10 times

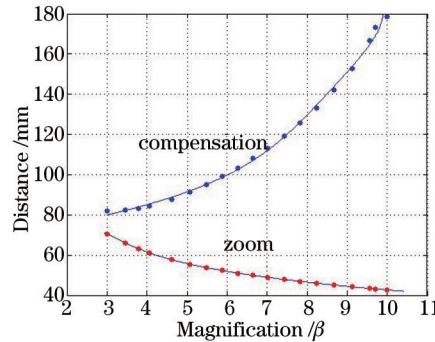


图3 系统变焦轨迹

Fig.3 Zoom paths of the system

3.1.3 像质分析

根据拉赫不变量 $J=ny=n'u'y'$, 当对物体进行放大时, 系统的像方数值孔径会变小, 因此在保证第一级的波像差满足应用要求的情况下, 以后各个级次的波前也一定能满足。因此像质分析时主要针对单级变焦系统进行; 再者, 由于最终接收的是中心点信号的能量信息, 因此仅对于中心点进行像质分析。

完整的仪器最终波像差可以表示为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_m^2 + \sigma_f^2 + \sigma_{al}^2 + \sigma_{en}^2 + \sigma_{mar}^2}, \quad (2)$$

式中 σ_r 表示设计残差, σ_m 、 σ_f 、 σ_{al} 、 σ_{en} 分别表示机械装配、加工、装调和环境引入的波像差, σ_{mar} 是为了保证系统的波前而预留的一定的量。系统的设计波像差如表2所示。

表2 中心点波像差和放大倍率关系

Table 2 Relationship between magnification and wavefront aberration of centroid

Magnification	3	6.5	10
Wavefront aberration of centroid	0.0213 λ	0.0200 λ	0.0164 λ

装调和机械机构导致的波前变化可以采用 ZEMAX 软件中的公差分析功能进行确定。采用表3中的公差结果对整个系统在不同放大倍率处进行分析。分析结果表明, 经过 500 次 Monte Carlo 模拟追迹后, 短焦处 90% 以上概率下, 系统波前差均方根(RMS)值为 0.0233 λ , 长焦处 90% 以上概率下, RMS 值为 0.0295 λ 。

表3 系统公差

Table 3 Tolerances of zoom system

Radius /Fringes	2
Thickness /mm	0.035
Surface decenter /mm	0.035
Surface tilt /($^\circ$)	0.03
Element decenter /mm	0.035
Element tilt /($^\circ$)	0.03
Index	0.004
Abbe /%	0.4
S+A Irreg /fringe	0.75

系统主要应用在实验室环境中,因此环境引入的波前变化很小,约为 0.01λ 。加工中曲率半径和透镜厚度误差等都能通过镜面之间的装调距离和后截距进行补偿,然而面型所引入的高频误差是无法进行补偿的,将直接计算到最终波像差中。光学系统中反射镜和透射镜面型引入的波像差 σ_{sf} 和 σ_{st} 计算分别如(3)式和(4)式所示,其中 n 为镜片折射率。由于面型误差没有规律,也是随机误差,因此面型引入的波像差(σ_s)变化如(5)式所示,

$$\sigma_{sf} = 2\sigma_s, \quad (3)$$

$$\sigma_{st} = (n-1)\sigma_s, \quad (4)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{sf}^2 + \sigma_{st}^2} = \sqrt{(2\sigma_s)^2 + \sum_{i=1}^{12} [(n_i-1)\sigma_{si}]^2}. \quad (5)$$

结合现有加工水平和系统要求,确定镜面的加工面型误差为 $\sigma_{si} = \lambda/60$ 。因此6个透镜12个表面引入的波像差为 0.0387λ ,可见面型将是影响光学系统波像差的主要因素。

将上面的分析结果代入(2)式进行计算,波像差在短焦和长焦位置分别为 0.0462λ 和 0.0497λ ,小于 0.05λ ,而且从表3中可以看出系统公差也能够满足当下的机械和装调精度。

图4为变焦系统分别在3倍,6.5倍和10倍放大率时的几何能量分布曲线。这3幅曲线图表明该系统在 $\phi 0.5\text{ mm}$ 接收口径内时,能量集中度均大于90%,满足要求。

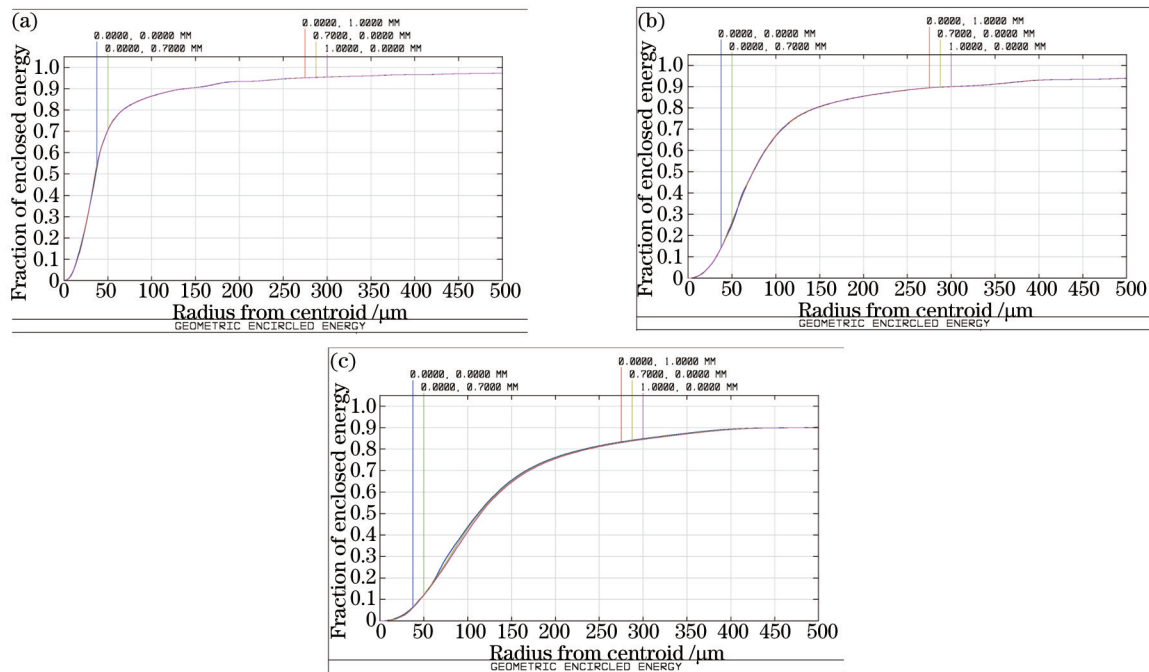


图4 光学系统几何能量曲线。(a) 3倍;(b) 6.5倍;(c) 10倍

Fig.4 Curves of optical energy distribution. (a) 3 times; (b) 6.5 times; (c) 10 times

3.2 四级级联系统设计

在上面的单级情况下,如果采用四级级联的情况,可以实现放大倍率在81~10000倍之间的倍率变化。综合系统得到光学结构如图5所示,系统的大小约为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,中心点波像差优于 0.1λ 。在变化过程中始终保持像面位置不变,仅通过每一级变倍组和补偿组的移动来进行变焦,实现总放大倍率的改变,并且加入反射镜,使系统结构紧凑,便于装调。

4 结 论

通信终端激光链路系统的性能检测是空间卫星通信技术中的关键性课题,根据光学系统的连续变焦原理设计了可变距离的空间链路衰减系统,用以模拟空间环境中利用激光在卫星间传递信息。链路系统单级可实现3~10倍连续变焦,四级级联可达到最高 10^4 倍变倍,等效传输距离 $10^3\sim 10^5\text{ km}$,装置紧凑,节省空间。该实验装置可以应用于不同的激光通信终端,在今后的空间通信发展中有较大应用价值。

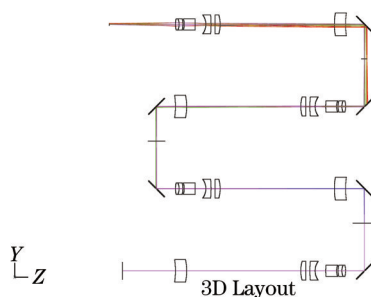


图5 四级级联光学系统

Fig.5 Four cascaded optical system

参考文献

- 1 Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 671~672.
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): 671-672.
- 2 K Inagaki, M Nohara, K Araki, *et al.*. Free-space simulator for laser transmission[C]. SPIE, 1991, 1417: 160-169.
- 3 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 147-155.
刘立人. 卫星激光通信II地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 147-155.
- 4 L Liu, L Wang, Z Luan, *et al.*. Physical basis and corresponding instruments for PAT performance testing of inter-satellite laser communication terminals[C]. SPIE, 2006, 6304: 63040C.
- 5 Wan Lingyu, Liu Liren, Zhang Mingli. On-ground simulation technology for free-space laser long-distance propagation [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(10): 1367-1370.
万玲玉, 刘立人, 张明丽. 自由空间激光远距离传输的地面模拟研究[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1367-1370.
- 6 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2675-2676.
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2675-2676.
- 7 Feng Xiuheng. Design of Optical System[M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
冯秀恒. 光学系统设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- 8 Bai Yuzhuo. Design of Optical Zoom Lens System[D]. Changchun: Changchun university of technology, 2007. 50.
白玉琢. 光学变焦透镜系统的设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2007. 50.
- 9 Jin Fengxi, Jin Hujie. Structural style's the best select device of vari-focus lens[J]. Optical Instruments, 2004, 26(1): 34-38.
金逢锡, 金虎杰. 变焦镜头结构形式的最佳选择方法[J]. 光学仪器, 2004, 26(1): 34-38.
- 10 Yan Lei, Jia Ping, Hong Yongfeng, *et al.*. Selection of cam curve for zoom lens[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 876-881.
晏蕾, 贾平, 洪永丰, 等. 变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 876-881.