

反射变距离激光传输链路几何衰减模拟系统研究

吴从均, 张新洁

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了能够在实验室内真实模拟激光通信光束在星间链路中的传输过程, 评估通信终端通信性能。首先对通信光束的传输过程进行了分析, 研究了激光通信光束传输和光学级联放大中心取样之间的关系; 接着, 采用物理光学的方法, 利用放大倍率和传输距离之间的关系设计了一可应用于不同通信波长和通信距离测试的链路模拟系统; 然后, 对研制的设备进行测试分析和标定, 并对放大倍率和能量衰减之间的关系进行分析; 最后, 讨论了该设备对于空间激光传输模拟距离精度的模拟情况。结果表明: 系统能够模拟 100 000 km 以内的激光通信终端, 对于距离的模拟精度约在 4% 以内, 稳定性在 2% 以内, 满足大多数情况下通信终端的测试要求。

关键词: 激光通信; 链路衰减模拟器; 反射变距离; 放大倍率; 精度分析

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.S218003

Laser transmission link's geometric attenuation simulation system with reflection variable distance

Wu Congjun, Zhang Xinjie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: It is important to establish the system that is used to evaluate the performance of the inter-satellite laser communication terminals (LCT) under the laboratory conditions before being sent to space. For this reason, beam transmission process of communication was analyzed, and the link simulation based on optical system was also developed in this paper. The relationship between beam transmission and optical magnification with center sampling was studied firstly. Using physical optics principle, the relationship between magnification and transmission distance was established in the next, and on the basis, a system that can be used to test different transmission wavelength and variable transmission distance LCT was designed. Then, the device was tested and calibrated, besides, the relationship between zoom magnification and geometric attenuation was also analyzed. Finally, the precision of transmission distance simulation was discussed. The results indicate that the apparatus can meet less than 100 000 km LCT's simulation with 4% precision of distance simulation and less than 2% stability, which can satisfy the most LCT's testing requirements.

Key words: laser communications; link attenuation simulator;
reflection variable distance; magnification; precision analysis

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805235)

作者简介: 吴从均(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光学仪器设计与检测方面的研究。Email: wucongjun789@163.com

0 引言

当下激光通信发展异常迅速,与其他设备的集成度越来越高,很多国家都在该领域投入巨大的人力和财力^[1-4]。相对于激光通信的快速发展对于通信终端的实验室检测设备研制的报道相对较少,很多时候都是通过长时间的外场实验来验证通信终端的性能,而外场实验的成本和周期都相对较长,对仪器的非应用性损耗也较大,再者外场试验的地域、大气和距离相对有限,这使得星间终端的外场实验将变得异常困难^[5-6],因此研制可靠的实验室检测设备,准确地对通信终端进行预先评估,将具有很大的工程意义。

在激光通信发达国家都有激光通信检测设备,如日本和美国等,相关的检测设备有 SILEX LCT 检测设备^[7]、LUCE 的目标终端地面辅助模拟测试设备(Ground Optical Assistance for LUCE, GOAL)-(Target Terminal Simulator, TTS)^[8]以及通信测试评估平台(Laser-com Test and Evaluation Station, LTES)^[9]。LTES 是 JPL/NASA 研制的激光检测评估平台,包含了激光通信所涉及的各个支路,主口径 200 mm,能够直接与被检测设备进行通信测试;国内中国科学院上海精密机械研究所的刘立人等采用了透射级联放大结构来模拟激光通信的光束传播过程,最大能够验证 375 km 的通信距离^[10]。而上述无论是实验室平台还是纯物理模拟都存在仅能对特定的通信波长和较短通信距离检测的问题,国内也有采用和 LTES 类似的关于检测平台的研究,但是相对较少^[11-13]。在参考文献[13]中虽然能够实现几十万千米的通信测试,但是难以应用于不同的测试波段,不能解决距离测量的连续化问题。在文中采用全反射级联结构可以实现 100 000 km 以内的不同波段,不同距离的连续测试。

1 变距离链路衰减系统原理及构成

1.1 链路衰减模拟器原理

链路衰减的原理和参考文献[13]中相同,结合了透镜傅里叶变换和空间发射光束远场 Fraunhofer 衍射原理。远距离能量传输时,通信设备相当于对自由传输的光束进行中心取样,而链路模拟,相当于采用物理方法对通信光束首先聚焦,再对光斑进行放大后作中心取样。链路衰减模拟器由两大部分组成,

傅里叶变换镜和级联放大器组成,如图 1 所示。

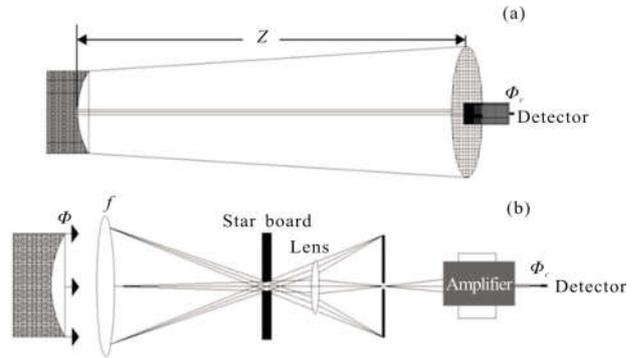


图 1 链路衰减模拟器原理

Fig.1 Principle of link attenuation simulator

其中,图 1(a)表示激光通信的实际传输模型,图 1(b)是链路衰减系统的模型原理图。根据衍射理论,远场高斯光束 Fraunhofer 衍射光强可表示为:

$$I(x_2, y_2) = I_A \int_{\Sigma} \exp[-(x_1^2 + y_1^2)/\omega^2(z)] \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

傅里叶变换焦平面光强分布可以表示为:

$$I_f = I_A \int_{\Sigma} \exp[-(x^2 + y^2)/\omega^2(z)] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (xx_f + yy_f)\right] dx dy \quad (2)$$

从公式(1)和(2)可以看出,傅里叶变换镜焦面上光强和远场光强度分布的区别仅是 l 和 f 相互“替换”,若对傅里叶变换镜面进一步采用物像放大(放大倍率 β),则焦面上的光强度分布为:

$$I_f = I_A \int_{\Sigma} \exp[-(x^2 + y^2)/\omega^2(z)] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda \beta f} (xx_f + yy_f)\right] dx dy \quad (3)$$

因此采用傅里叶镜和多级放大方式得到的等效传输距离为:

$$Z_e = \beta f \quad (4)$$

另外接收光强度大小还与所选用的傅里叶变换像面的取样口径 Φ 和通信终端口径 Φ_c 有关,因此对公式(4)进行进一步修正,修正后等效模拟距离为:

$$Z_e = \beta f \Phi_c / \Phi \quad (5)$$

1.2 连续变距离级联式衰减模拟器工作原理

在参考文献[13]中采用了变焦结构实现变距离传输模拟,而在设计中采用导轨移动物距和像距离的同时变化实现可变距离,其基本原理如图 2 所示。

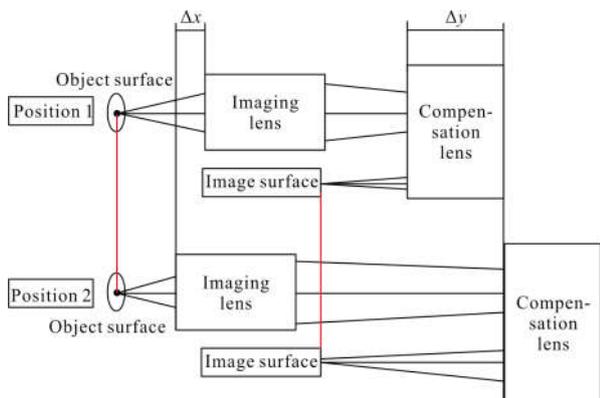


图 2 变距离衰减模拟器工作原理

Fig.2 Working principle of variable distance attenuation simulator

在图 2 中物象移动时,必须保证像面(接收器)位置不变,在上图中物面移动距离为 Δx ,而像面移动距离为 $(2\Delta y - \Delta x)$,假设在位置 1 处放大倍率为 β_1 ,位置 2 处放大倍率为 β_2 ,根据光学理论,设成像镜组的焦距为 f ,放大倍率变化 $\Delta\beta(\beta_2 - \beta_1)$ 和物象变化之间满足关系如公式(6)和公式(7)所示:

$$\Delta x = \Delta\beta f / (\beta_1 \beta_2) \quad (6)$$

$$\Delta y = (\Delta\beta f - \Delta x) / 2 \quad (7)$$

根据公式(6)和(7),光学系统的焦距可以测量得出,当知道具体的放大倍率后,可求解出物象移动的距离,而且能够保证物面和像面的位置不变。对于多级级联,将上级次的像面作为下级次的物面,依次级联就可以设计级联结构的链路衰减模拟系统。

2 变距离链路衰减系统设计

2.1 变距离链路衰减系统要求

傅里叶变换镜采用反射离轴光管,焦距为 20 m,口径为 500 mm,视场为 $600 \mu\text{rad}$,而一般空间激光通信距离基本都在 100 000 km 以内,通信波长均在 800~1 550 nm 之间,据上述要求确定变距离链路衰减系统的设计参数如表 1 所示。

从表 1 可知,系统要求的应用波段比较宽,根据公式(5),如果采用的中心取样口径为 0.5 mm,而实际激光通信的终端口径为 250 mm,那模拟 100 000 km 需要放大倍率为 10 000 倍。根据 2.2 及光学相关光学理论,对于宽波段应用可以采用反射式实现,对于距离可调采用物像连续移动实现,对于大范围放大倍率通过多级级联实现。

表 1 变距离链路衰减系统参数

Tab.1 Parameters of variable distance link attenuation system

Parameters	Values
Wavefront of the single link RMS($\lambda=632.8 \text{ nm}$)	$<0.05\lambda$
Wavefront of the four cascaded link RMS/ λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)	<0.1
Object space NA	≥ 0.025
Transmission of the single link	≥ 0.85
Magnification adjustment accuracy (single cascaded)	$\leq 4\%$
Magnification repeated positioning accuracy	$\leq 1\%$
Magnification stability(average)	$\leq 2\%$
Simulated distance/km	10–10 000
Distance simulation accuracy	$\leq 5\%$
Wavelength/nm	800–1 550
Operating mode	Continuous

2.2 光学设计结果

根据公式(6)和(7)可知,必须合理选择光学设计的焦距和单级放大倍率。若焦距过长,单级放大倍率过大,物像移动距离过远,难以保证远距离导轨的精度,且会加大光学系统的难度;若焦距过短,单级放大倍率过小,则所需级数会增多,此时结构布局和装配测试极为不便。在保证应用要求的前提下,通过优化选择系统焦距约为 54.045 mm,单级放大倍率变化为 3~10 倍,系统共包含四个级联级次,光学设计的单机光学系统见图 3,四级级联后光路见图 4。

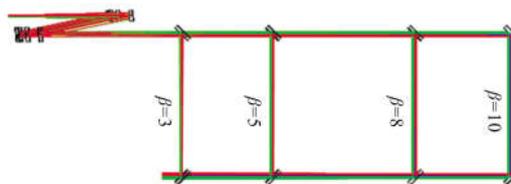


图 3 单级变距离衰减模拟器光学系统图

Fig.3 Optical system of single cascade variable distance attenuation simulator

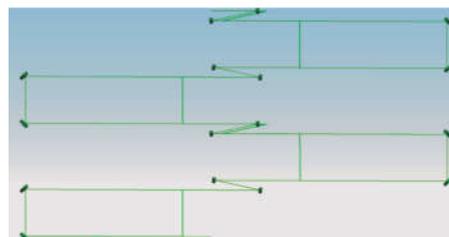


图 4 四级级联后变距离衰减模拟器光学系统

Fig.4 Optical system of variable distance attenuation simulator after four cascades

光学系统单级波像差均方根设计结果如表 2 所示。

表 2 单级系统波像差均方根($\lambda=632.8\text{ nm}$)
Tab.2 RMS of wavefront aberration of single cascade system($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Magnification	3	5	8	10
Wavefront RMS	0.038 λ	0.036 λ	0.033 λ	0.031 λ

光学元件均为平面或球面，加工面型为 $\lambda/100$ ，元件口径均为 10 mm，此时采用公差合成的放大所得单级的最大波前差约为 0.047 3 λ ，由于后一级次的物方数值孔径为前一级次的像方数值孔径，而且每个镜面所用的口径越来越小，因此后级的波前远小于前一级次。根据误差和成原理，全系统的波前优于 0.1 λ 。

2.3 结构设计结果

根据公式(6)和(7)，物像移动的最大距离范围分别为 12.7 mm 和 184.5 mm。结构设计时，为了保证放大倍率的调整精度和放大倍率的重复定位精度以及距离模拟精度，通过精度分析可知需要导轨的移动

和晃动精度在 5 μm 以内。通过对比和调研选择日本的安川 SGMMV-AIE2A21 电机和 THK 超精密级别的 HRW 直线滚珠导轨，位置反馈信息使用编码器实现(分辨率为 0.5 μm)，这样能够保证导轨移动精度和刷新速度，四级级联后的结构模型见图 5。

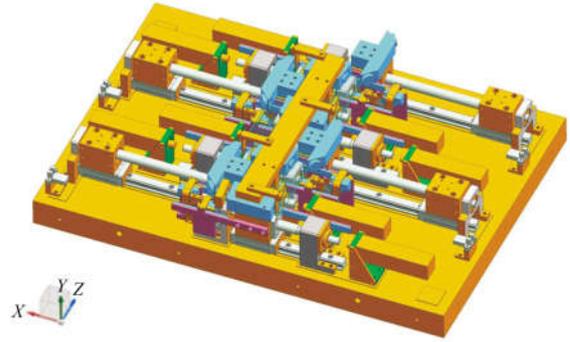


图 5 变距离衰减模拟器结构模型图

Fig.5 Structure model of variable distance attenuation simulator

图中不同颜色代表不同级次。全系统平面尺寸为 575 mm \times 440 mm。图 6 是整个系统装调完毕后的实际仪器图。全系统共包含八根直线导轨，八根导轨的电控结构如图 7 所示。

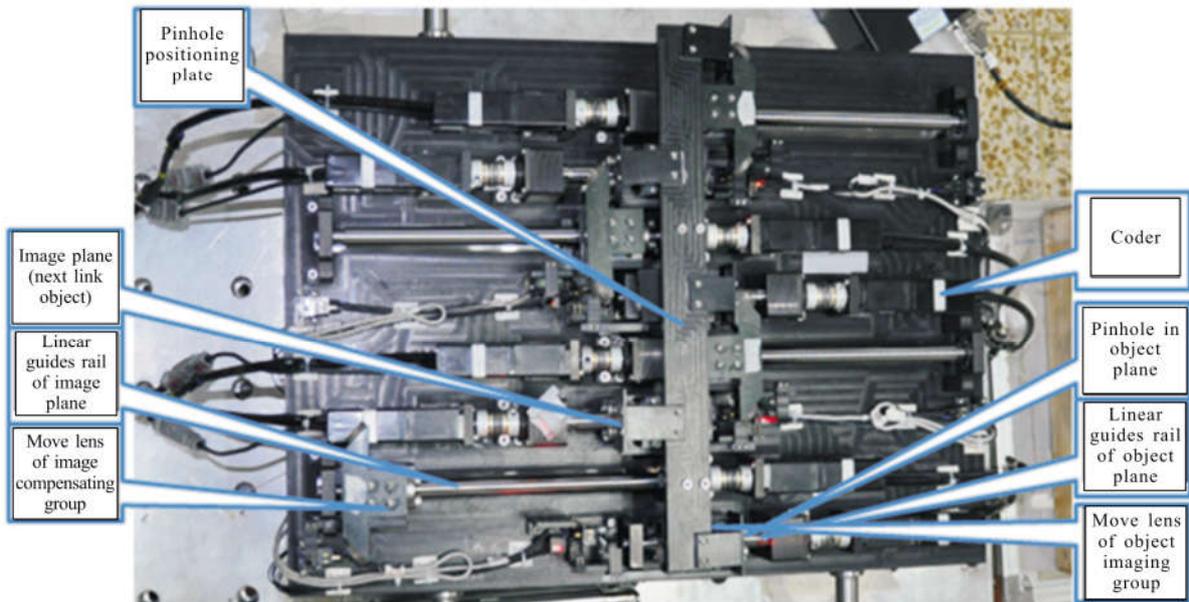


图 6 变距离衰减模拟器实物图

Fig.6 Actual articles of variable distance attenuation simulator

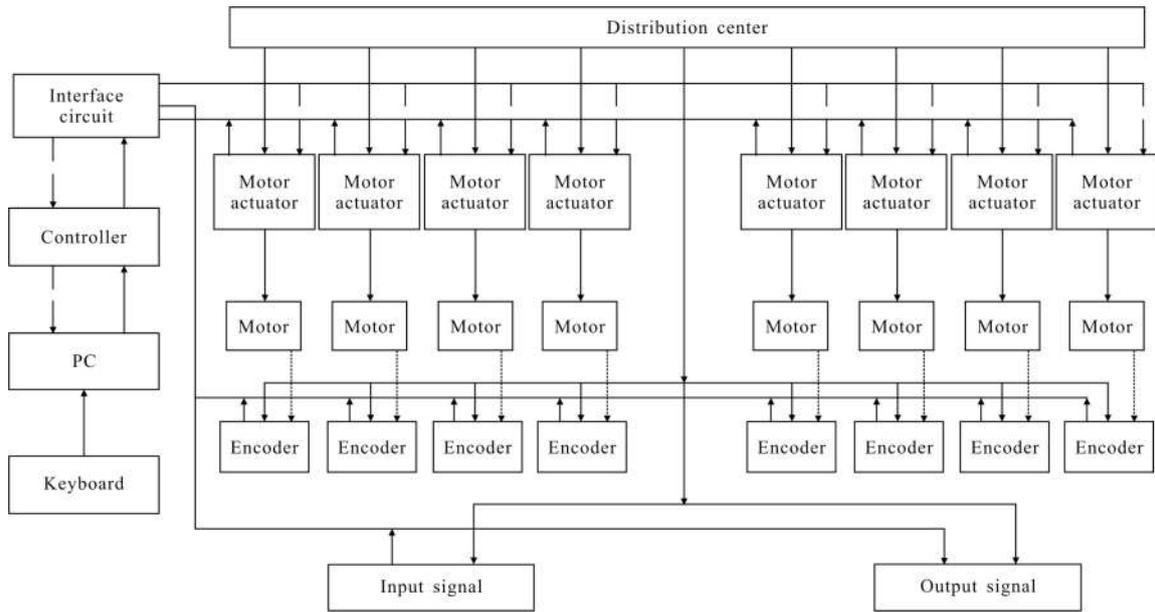


图 7 变距离衰减模拟器电控结构图

Fig.7 Electronic control structure of variable distance attenuation simulator

3 变距离链路衰减系统测试分析

3.1 光学参数测试

光学参数测试包含波像差和焦距和透过率测试,采用干涉仪对单级光学系统检测后的波前如表 3 所示。

表 3 单级系统波像差均方根检测结果
($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Tab.3 Test results of RMS of single cascade's wavefront aberration system($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Magnification	First link	Second link	Third link	Fourth link
3	0.048 λ	0.046 λ	0.047 λ	0.046 λ
5	0.037 λ	0.036 λ	0.039 λ	0.038 λ
10	0.034 λ	0.034 λ	0.035 λ	0.034 λ

对光学系统焦距测试时,由于光学系统 F 数太大,采用平行光管和 CCD 测试结果精度很难满足应用要求,因此在实际测量中通过测试物距变化和相机读出的像面放大倍率的变化确定系统的焦距,并根据公式(6)进行求解,此时物面移动精度为 $1\ \mu\text{m}$,测试后四个单级装调后的焦距分别为 53.850、54.026、55.255、54.867 mm。透过率采用激光器分别测试物面星点输入和全系统输出的光功率来确定,经测试,单

级系统的透过率分别为 0.897 9,0.896 7,0.891 7 和 0.891 2。

虽然光学系统设计要求的单级放大倍率为 3~10 倍,而实际结果由于加工、装配误差的存在需要根据焦距大小进行标定,标定结果为实际系统的放大倍率变化情况。

3.2 导轨初始位置标定和单级放大倍率测试

放大倍率测试图如 8 所示,测试系统主要由测微目镜、平面反射镜、光源(激光器)以及物面标记物(标准铜丝)组成。在设备初始使用时默认像面和物面位移量都为 0 mm,放大倍率为 3 倍,而实际的焦距与理论有所差别,在公式(6)和(7)中假设初始放大倍率为 β_1 ,在实际应用中需要对使公式(6)和(7)进行修正,方法是将系统的像方位于最远位置,并在像方采用相机监视,通过调节物面星点位置直到像面清晰,确定出此时的放大倍率。实际应用中物方和像方的移动距离有限,如果焦距大于理论焦距,像距将成为限制放大倍率的因素;反之,物距将成为限制放大倍率的因素。当像距成为限制放大倍率因素时,可以将物方移动距离增加一修正值,定位初始放大倍率时物方的位置,同理对于物距限制可以通过对初始的像方位置修正,并且重新标定各个级次的放大倍率变化范围。四单级级次修正结果分别如公式(8)~(11):

$$\text{第一级: } \begin{cases} \text{物方: } \Delta x_1 = f_1(1/\beta_1 - 1/\beta_2) \\ \text{像方: } \Delta y_1 = [f_1(\beta_2 - \beta_1) - \Delta x_1]/2 + 2.534 \end{cases} \quad \beta_1 = 2.971(8)$$

$$\text{第二级: } \begin{cases} \text{物方: } \Delta x_2 = f_2(1/\beta_1 - 1/\beta_2) \\ \text{像方: } \Delta y_2 = [f_2(\beta_2 - \beta_1) - \Delta x_1]/2 + 2.513 \end{cases} \quad \beta_1 = 2.980 \quad (9)$$

$$\text{第三级: } \begin{cases} \text{物方: } \Delta x_2 = f_3(1/\beta_1 - 1/\beta_2) + 0.530 \\ \text{像方: } \Delta y_2 = [f_3(\beta_2 - \beta_1) - \Delta x_1]/2 \end{cases} \quad \beta_1 = 3.122 \quad (10)$$

$$\text{第四级: } \begin{cases} \text{物方: } \Delta x_2 = f_4(1/\beta_1 - 1/\beta_2) + 0.363 \\ \text{像方: } \Delta y_2 = [f_4(\beta_2 - \beta_1) - \Delta x_1]/2 \end{cases} \quad \beta_1 = 3.078 \quad (11)$$

公式(8)~(11)中 β_1 为最小放大倍率,修正后各级次的最大放大倍率依次为 9.962, 9.987, 10.027, 10.032。因此整个系统的放大倍率可在 85~10008 倍之间调整。

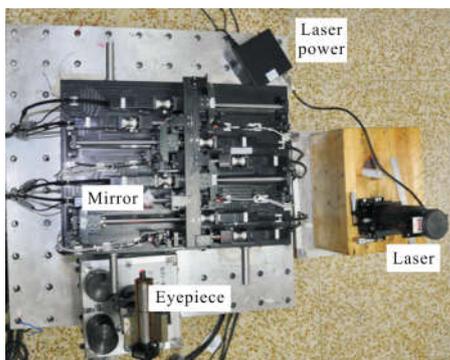


图 8 放大倍率测试图

Fig.8 Test chart of magnification

3.3 单级放大倍率精度

单级放大倍率调整精度的影响因素有: 导轨移动精度和读数误差两方面。读数精度由读数像元精度决定,像面显微物镜放大倍率为 4 倍,相机读数精度为 1 pixel,相机像元尺寸 10.6 μm ,所以读数精度约为 2.65 μm ,导轨移动精度为 1 μm ,两个因素对放大倍率相对精度影响分别表示为:

$$\Delta\beta_{\text{导轨}}^2 = |\Delta l'/l|^2 + |l'\Delta l/l^2|^2 = (1 + \beta^2)|\Delta l'/l|^2/\beta^2 \quad (12)$$

$$\Delta\beta_{\text{读数}}^2 = |\Delta y'/y|^2 + |y'\Delta y/y^2|^2 = (1 + \beta^2)|\Delta y'/y|^2/\beta^2 \quad (13)$$

放大倍率相对误差为上述两误差合成,通过计算各个级次在不同放大倍率时精度如表 4 所示,从表可以知道单级放大倍率精度都优于 4%。

表 4 放大倍率精度

Tab.4 Precision of magnification

Magnification	3	5	8	10
First link	0.037 7	0.036 4	0.036 0	0.035 9
Second link	0.035 4	0.034 2	0.033 8	0.033 7
Third link	0.038 2	0.037 0	0.036 5	0.036 4
Fourth link	0.037 4	0.036 2	0.035 8	0.035 7

3.4 级联后放大倍率

由于系统放大倍率过大,当放大倍率大于 100 倍时,CCD 相机的尺寸很难满足放大后像面的视场要求,因此仅测试两级级联后的放大倍率,测试结果如表 5 所示。在表中前级 β 在一二级级联时表示第一级、二三级级联时表示第二级、三四级级联时表示第三级。

表 5 两级级联后放大倍率测试结果

Tab.5 Test result of two adjacent cascade's magnification

Cascaded links	Former link β	3	5	8	10
First-second cascaded	10	30.13	51.27	83.20	101.79
	Theoretical value	30.12	50.71	79.30	100.19
	Error	0.03%	1.09%	4.69%	1.57%
	7	20.73	34.53	56.53	70.27
	Theoretical value	21.05	35.44	55.42	70.02
	Error	1.54%	2.64%	1.96%	0.36%
	3	8.67	14.60	22.77	28.67
	Theoretical value	8.91	15.00	23.46	29.64
	Error	2.77%	2.74%	3.03%	3.38%
	10	30.35	47.69	79.42	99.49
	Theoretical value	29.24	48.86	78.75	98.83
	Error	3.66%	2.45%	0.84%	0.66%
Second-third cascaded	7	21.37	34.42	55.70	70.51
	Theoretical value	20.93	34.98	56.38	70.76
	Error	2.06%	1.63%	1.22%	0.35%
	3	8.83	14.60	24.53	29.40
	Theoretical value	9.00	15.04	24.24	30.42
	Error	1.93%	3.01%	1.18%	3.47%
	10	30.24	51.70	82.30	101.94
	Theoretical value	30.15	49.59	79.82	97.94
	Error	0.30%	4.08%	3.01%	3.92%
	7	22.12	34.91	55.64	71.24
	Theoretical value	21.27	34.98	54.20	69.09
	Error	3.84%	0.20%	2.59%	4.36%
Third-fourth cascaded	3	9.06	14.76	22.82	29.03
	Theoretical value	9.06	14.90	23.09	29.43
	Error	0%	0.95%	1.18%	1.38%

从测试结果可以看出两级放大倍率误差基本能够控制在 2.14% 以内。而放大倍率误差直接反映了链路衰减系统对于距离模拟精度。根据误差合成原理,误差能够控制在 3.03% 以内,满足 4% 的要求。

3.5 放大倍率精度验证

放大倍率可以采用能量的衰减程度进行精度验证,假设物面光源能量分布均匀,此时后面级次的物面星点和前级物面星点大小相同,如星点大小均为 0.5 mm,在不考虑系统透过率时,物面星点后和像面星点后测试的能量衰减比正比于放大倍率平方;因此在测试放大倍率精度时采用测试衰减后的光功率,通过光功率衰减倍数与理论值之间关系,推导放大倍率精度。测试图如图 9 所示。

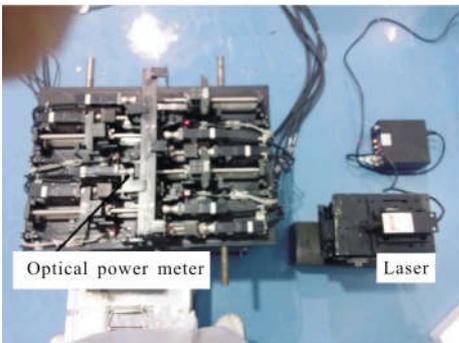


图 9 不同放大倍率光功率衰减测试

Fig.9 Picture of optical power attenuation of different magnification

根据衰减倍率(M)和放大倍率之间关系,放大倍率误差可以表示为:

$$\delta_\beta = \delta_M / (2\beta) \quad (14)$$

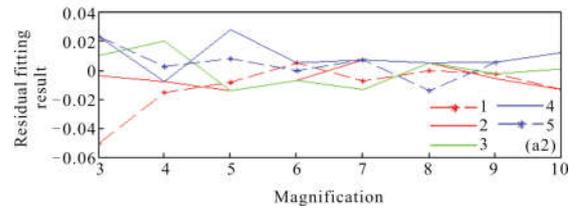
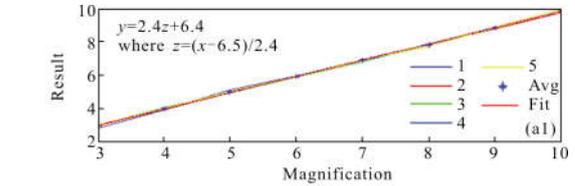
而 δ_M 就是测试理论能量衰减倍率的误差大小。根据测试结果计算测试结果和实际理论放大倍率之间满足程度也非常好,基本能够保证放大倍率精度在 1% 以内,这表明设备能够很好地模拟空间光束的传输和取样过程。

3.6 放大倍率稳定性

对于放大倍率的稳定性,每一级次在间隔 1 h 后,重新测试其放大倍率,测试 5 次,测试结果稳定性如图 9 所示,每幅图片第一个图横坐标表示理论放大倍率,纵坐标表示测试结果,下图为残差拟合结果。

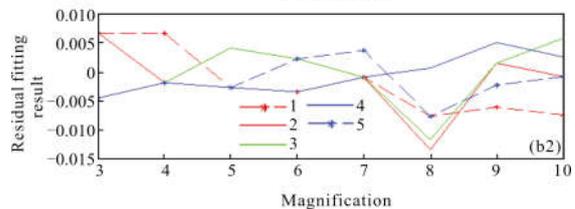
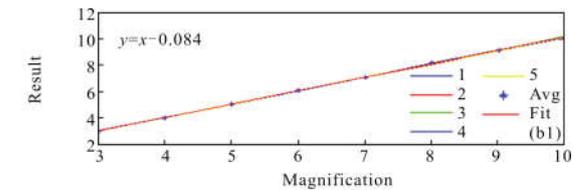
根据测试结果,采用直线拟合后的残差分别为 $c_1=0.098, c_2=0.054, c_3=0.226$ 和 $c_4=0.067$ 。从 5 次测试结果可以看出,5 次测试中每一级次的最大偏差分

别为:4.9%,1.37%,1.6%和 3.2%。而且 4.9% 的点仅有一个,大部分点都能满足 2% 的稳定性要求,平均值稳定性优于 1.6%。



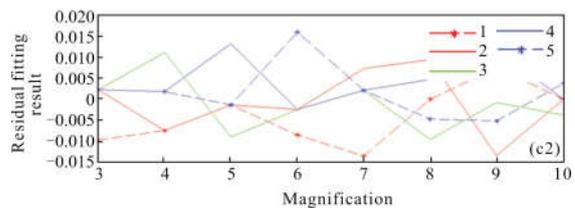
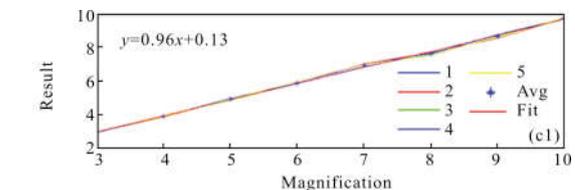
(a) 第一级次

(a) First cascaded



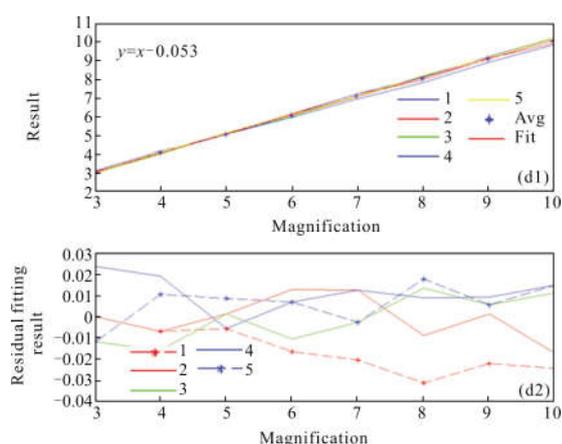
(b) 第二级次

(b) Second cascaded



(c) 第三级次

(c) Third cascaded



(d) 第四级次

(d) Fourth cascaded

图 9 放大倍率稳定性测试结果

Fig.9 Stability test result of the magnification

5 结论

文中根据空间激光通信存在距离远、通信波长不一致、地面试验困难等问题,根据高斯光束的远场 Fraunhofer 衍射和透镜傅里叶变化之间的关系,提出了采用反射式级联形式的激光通信地面监测设施,并介绍了该设施的组成和工作原理。然后根据不同距离、不同波段激光通信终端应用需求,研制了可用于 100 000 km 以内通信终端检测的设备。通过对设备的检测和标定结果表明,系统对通信距离的模拟精度在 4% 以内,稳定性在 1.6% 以内,四级级联后的放大倍率变化在 85~10 007 倍范围内,而且对于通信距离模拟连续可调。和其他已报道的类似设备相比系统不仅实现了连续距离模拟、而且能够使用在不同的激光通信波段,设备集成程度高、使用方便,能够满足大多数空间通信终端的检测需要^[10-13]。

参考文献:

[1] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)

[2] Toyos hima M. Optical space communications in Japan [J]. *Function Materials*, 2003, 10(3): 428-437

[3] Bohmer K, Gregory M, Heine F, et al. Laser communication terminals for the european date relay system [C]//SPIE, 2012, 8246: 82460D.

[4] Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, 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)

[5] Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong, et al. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. *Opt & Precision Eng*, 2014, 22 (12): 3231-3238. (in Chinese)

[6] Wang Tingyu, Chen Jiabi. Shading effect of rain drops in ship free space laser communication [J]. *Opt & Precision Eng*, 2014, 22(10): 2652-2658. (in Chinese)

[7] Dumas R, Laurent B. System Test bed for demonstration of the optical space communications feasibility [C]//SPIE, 1990, 1218: 398-411.

[8] Shikatani M, Toyoda M. Ground system development f or the ET S-VI/ LCE laser communications experiment [C]// SPIE, 1993, 1866: 21-29.

[9] Wilson K E, Page N, Biswas A, et al. The lasercom test and evaluation station for flight terminal evaluation [C]//SPIE, 1996, 2990: 152-158.

[10] Liu Liren. Laser communication in space II Test and verification techniques on the ground [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(2): 147-154. (in Chinese)

[11] Wu Congjun. Study of inter-satellites laser communication terminals and its laboratory testing platform's optical system [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[12] Tian Y, Yan C X. Design of optical zoom system for space link simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 102202-6. (in Chinese)

[13] Wan Lingyu, Liu Liren, Zhang Mingli. On-ground simulation technology for free-space laser long-distance propagation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1367-1370. (in Chinese)