

高精度多波段空间光通信端机远场分布测试系统研究

赵发财^{1,2} 孙权社¹ 王少水¹ 王国权¹ 郑祥亮¹ 韩 忠¹

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 分析了基于透镜的傅里叶变换特性实现空间光通信端机远场分布测试原理, 以球差、彗差为代表模拟测试系统自身像差对端面光强分布的影响, 由结果可以看出球差主要影响最大光强, 其分布仍然保持旋转对称性, 而彗差不仅使得光强峰值减弱, 且接收面上光强变为非旋转对称分布, 当系统像差均方根(RMS)值小于 0.02λ 时, 最大光强的变化小于 0.2% , 可以忽略不计。基于以上分析, 设计了离轴卡塞格林长焦系统, 利用 Zemax-EE 对系统进行了分析, 分析结果表明, 在整个工作波段($800 \sim 1700 \text{ nm}$)内, 中心视场 RMS 值为 0.0001λ , 全视场点列图均远优于衍射极限。对研制完成的远场分布测试系统进行了测试, 得到的光斑暗环实际值与理论值的误差均在 2.5% 以内, 满足要求。

关键词 光通信; 空间激光通信; 远场分布; 像差分析; 光学设计

中图分类号 T929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s206004

Study on High Precision and Multiband Far Field Distribution Measuring System of Space Laser Communication Terminals

Zhao Facai^{1,2} Sun Quanshe¹ Wang Shaoshui¹ Wang Guoquan¹

Zheng Xiangliang¹ Han Zhong¹

¹41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China

² Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract The principle of the far field distribution measurement of space laser communication terminals based on the Fourier-transform characteristics of lens is analyzed. The influence of test system with spherical and coma aberrations on the far field distribution of the beam is described and simulated. The simulated results show that the spherical and coma aberrations both reduce the maximum power at the receiving plane and the rotational symmetry of field distribution is only influenced by coma aberrations. The maximum power changes by lower than 0.2% with the root mean squares (RMS) developed. The measurement system is analyzed with Zemax-EE software. The analyzed results demonstrate that the RMS aberrations of the test system are below 0.02λ . The wavefront error of a long focal off-axis Cassegrain optical system is less than 0.0001λ in the working wavelength ($800 \sim 1700 \text{ nm}$) and good diffraction-limited quality is obtained in full field. The experimental results indicate that the maximum dusky ring dimension error is less than 2.5% compared with the theoretical values. These results prove the feasibility of the far field distribution measurement system.

Key words optical communications; space laser communications; far field distribution; aberration analysis; optical design

OCIS codes 060.4510; 140.3295; 220.4830

1 引 言

空间光通信是以激光作为信息载体, 在卫星、地面、星际探测器以及各类航天器和空间站、海洋舰艇、空

收稿日期: 2015-03-03; 收到修改稿日期: 2015-04-12

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金(9140C120302130C12052)

作者简介: 赵发财(1984—), 男, 博士, 工程师, 主要从事空间激光通信系统校准技术方面的研究。E-mail: zfcboom@163.com

间机群之间进行高速数据传输的通信方式,是光通信技术在空间应用领域拓展,也是现代大容量高速通信领域的重要研究方向。与传统的微波卫星通信系统相比,卫星光通信系统工作频率要低几个数量级,具有速率高、容量大、体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、保密性和安全性好等多种优点,因此具有广阔的军事和民用前景^[1-3]。

在空间光通信终端的研制过程中,端机出射光束的远场分布是空间光通信终端的重要指标,对链路功率进行核算及端机性能评估具有重要的意义,必须进行精确测量。端机出射光束的远场分布目前有两种测量方法,一种是在端机出射光束满足远场条件下的直接测量^[4],一般情况下距离要达到几十公里,这种方法通常会受到大气扰动、天气等环境条件的限制,另外如卫星之间通信距离达几千至上万公里的情况也难以采用这种方法。因此,在实验室内对空间光通信端机远场分布的测试主要是采用透镜焦平面测试的方法^[5]。万灵玉等^[6-7]根据透镜的傅里叶变换性质,提出了采用光学傅里叶变换加级联光学成像放大并结合有限口径接收的方法来实现自由空间激光光束远距离传输的实验室模拟,但是文献中只给出了原理验证实验,并没有光通信端机的远场分布实测数据,且存在系统装调困难、像差影响大的问题。王建民等^[8]同样是采用透镜焦平面接收,获得远场分布的方案,并提出了基于差分平方和函数(SPSMD)算子的图像处理方法解决透镜焦面确定问题,但是文献中并没有对测试系统自身的像差对远场分布的影响进行分析,而且设计系统的测量波段主要针对 800 nm 的波段,不能覆盖 1.064 μm 和 1.55 μm 这两个未来空间光通信发展的主要工作波段。因此,本文基于透镜的傅里叶变换特性实现远场分布测试的原理,理论推导了测试系统自身像差对远场接收平面光场分布的影响,基于离轴卡塞格林式结构设计了一套高精度多波段空间光通信端机远场分布测试系统。

2 透镜焦平面远场分布测量原理

利用透镜的傅里叶变换特性,在透镜的后焦面得到聚焦点光场分布模拟端机出射光束的远场分布^[9],理论分析如下。

在实际的空间光通信链路中,通信发射、接收端机之间的通信距离 Z 通常为几百公里甚至达到上万公里,根据夫琅禾费衍射理论,接收端机处的光斑为夫琅禾费远场,设光束在发射端机光学天线处的光场分布为 $U_0(\zeta, \eta)$,则根据夫琅禾费衍射公式得到接收端机处远场分布为 $U(x, y, z)$:

$$U(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda Z} \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2Z}\right) \iint_S U_0(\zeta, \eta) \exp\left[-ik \left(\frac{x\zeta + y\eta}{Z}\right)\right] d\zeta d\eta, \quad (1)$$

式中 k 为波数, S 为发射端机光学系统出射孔径的面积, (x, y, z) 和 (ζ, η) 分别为通信 Z 距离处接收端机和发射端机光学天线的坐标,坐标定义如图 1(a) 所示。

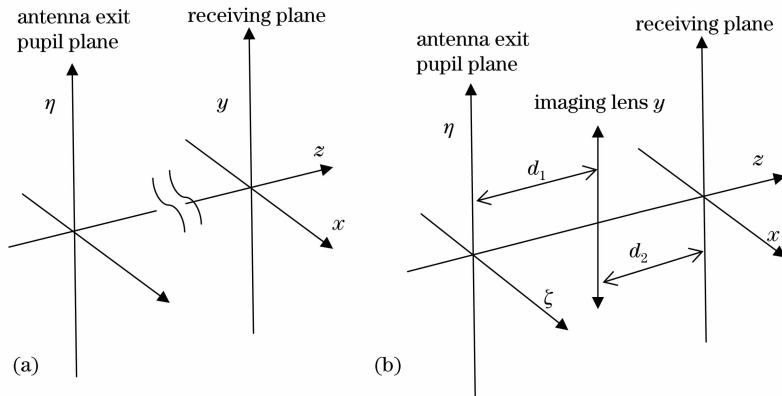


图 1 端机测试系统的坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinates in the terminal measurement system

如果空间光通信端机出射光束通过一个透镜,如图 1(b) 所示,透镜焦距为 f ,端机光束出射面位于透镜前 d_1 处,接收探测面位于透镜后 d_2 处,则根据菲涅耳衍射积分公式得到透镜后焦面上即 $d_2 = f$ 时的光场分布为

$$U(x, y, z) = \frac{A}{i\lambda f} \iint_{\Sigma} U_0(\zeta, \eta) \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{f}\right)\right] d\zeta d\eta, \quad (2)$$

式中参数 A 的表达式为

$$A = \frac{\exp[ik(d_1 + f)]}{i\lambda f} \exp\left[i\frac{k}{2f}\left(1 - \frac{d_1}{f}\right)(x^2 + y^2)\right]. \quad (3)$$

当端机天线靠近透镜测试时,即 d_1 接近于 0,则参数 A 的表达式变为

$$A = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]. \quad (4)$$

比较发射端机在接收端机位置处形成的实际远场分布表达式(1)式与透镜焦面变换的表达式(2)式和(4)式,可知两者在形式上是一致的,因此可以通过透镜变换,在其焦面上模拟得到端机出射光束的远场分布。实际测试时采用的电荷耦合器件(CCD)等探测器只能对光的强度有响应,而不能直接得到光束的光场分布,根据(1)式和(2)式,忽略常相位因子得到接收端的光强分布分别为

$$I_z(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \left| \iint_{\Sigma} U_0(\zeta, \eta) \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{z}\right)\right] d\zeta d\eta \right|^2, \quad (5)$$

透镜后焦面上的光强分布为

$$I_f(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 f^2} \left| \iint_{\Sigma} U_0(\zeta, \eta) \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{f}\right)\right] d\zeta d\eta \right|^2. \quad (6)$$

3 测量系统像差对端机远场分布的影响分析

由于目前光学加工、装调水平的限制,远场分布测试系统也不可能是完美的,不可避免地存在着一定的像差,这会直接影响到测试系统焦面上的光场分布,因此进行测量系统像差对端机远场分布的影响分析,对测试系统的光学设计及测量结果评价等均有重要的意义。

空间光通信端机天线出射光束可以用高斯光束表示为

$$U_0(\zeta, \eta) = CP(\zeta, \eta) \exp\left(-\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2\omega_0^2} - ik\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2R}\right), \quad (7)$$

式中 C 为常数, R 为端机天线出射面上高斯光束的半径, ω_0 为高斯光束的束腰半径,孔径函数 $P(\zeta, \eta)$ 为

$$P(\zeta, \eta) = \begin{cases} 1 & r_1 < \sqrt{\zeta^2 + \eta^2} < r_2 \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 r_1 为端机天线次镜遮拦半径, r_2 为端机天线主镜半径。

空间光通信端机天线出射光束经过透镜后由 CCD 等面阵探测器接收,测试系统自身的像差影响可以用像差项 $\exp(i\Phi)$ 来表示,透镜后焦面的光场分布可以表示为

$$U(x, y, z) = \frac{C}{i\lambda f} \iint_{\Sigma} P(\zeta, \eta) \exp\left(-\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2\omega_0^2} - ik\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2R}\right) \exp(i\Phi) \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{f}\right)\right] d\zeta d\eta. \quad (9)$$

对像差项 $\exp(i\Phi)$ 利用泰勒级数展开,代入(9)式可以得到

$$U(x, y, z) = \frac{C}{i\lambda f} \iint_{\Sigma} P(\zeta, \eta) \exp\left(-\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2\omega_0^2} - ik\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2R}\right) \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{f}\right)\right] d\zeta d\eta + \frac{C}{i\lambda f} \iint_{\Sigma} P(\zeta, \eta) \exp\left(-\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2\omega_0^2} - ik\frac{\zeta^2 + \eta^2}{2R}\right) \left[\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i\Phi)^k}{k!}\right] \exp\left[-ik\left(\frac{x\zeta + y\eta}{f}\right)\right] d\zeta d\eta. \quad (10)$$

(10)式中第一项表示测试光学系统理想的情况下得到的光场,第二项表示测试光学系统存在的像差对接收面上光场的影响。为了进行数值模拟计算,像差项 Φ 可以用均方根值(RMS)表示为

$$\Phi_{\text{rms}} = \sqrt{[\Phi(x_i, y_j) - \overline{\Phi(x_i, y_j)}]^2}, \quad (11)$$

$$\overline{\Phi(x_i, y_j)} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \Phi(x_i, y_j). \quad (12)$$

利用 Matlab 对远场测试系统自身的像差对端机出射光束在透镜焦平面的远场分布的影响进行模拟分析,设空间光通信端机的工作波长 $\lambda=850\text{ nm}$,端机天线主镜半径为 $r_2=150\text{ mm}$,次镜半径为 $r_1=15\text{ mm}$,出射功率为 100 mW ,远场测试系统透镜焦距 $f=20\text{ m}$,接收探测器 CCD 像元数为 $512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$,像元大小为 $a=7.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

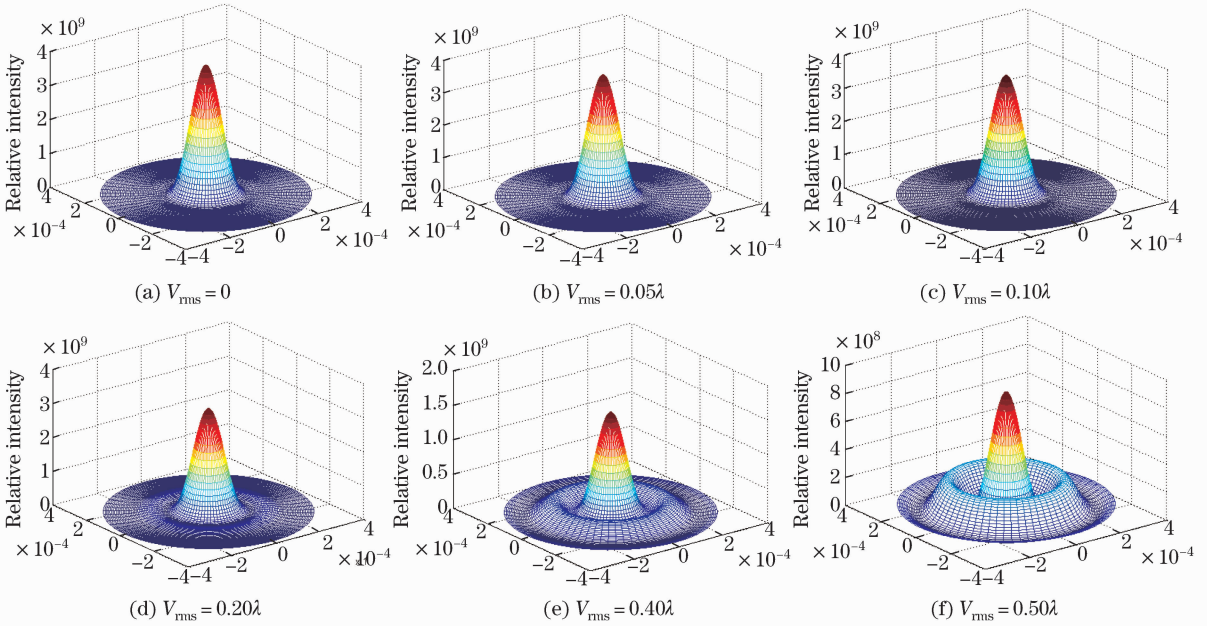


图 2 测试系统球差对焦面光强分布的影响

Fig. 2 Influence of the measurement system spherical aberration on the three-dimensional field distribution at focal plane

图 2 为测试系统不存在系统像差 ($\Phi_{rms}=0$) 和存在球差的均方根值分别为 $0.05\lambda, 0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.4\lambda, 0.5\lambda$ 情况下,端机出射光束在 CCD 探测器接收面上不同位置处的强度分布。由图 2 可知,与测试系统不存在像差 ($V_{rms}=0$) 相比,系统球差会使得 CCD 探测器接收面上的光强峰值减弱, V_{rms} 越大,光强峰值下降越多,但光场仍然保持旋转对称性,而且系统球差并不改变接收面上光束的中心位置。

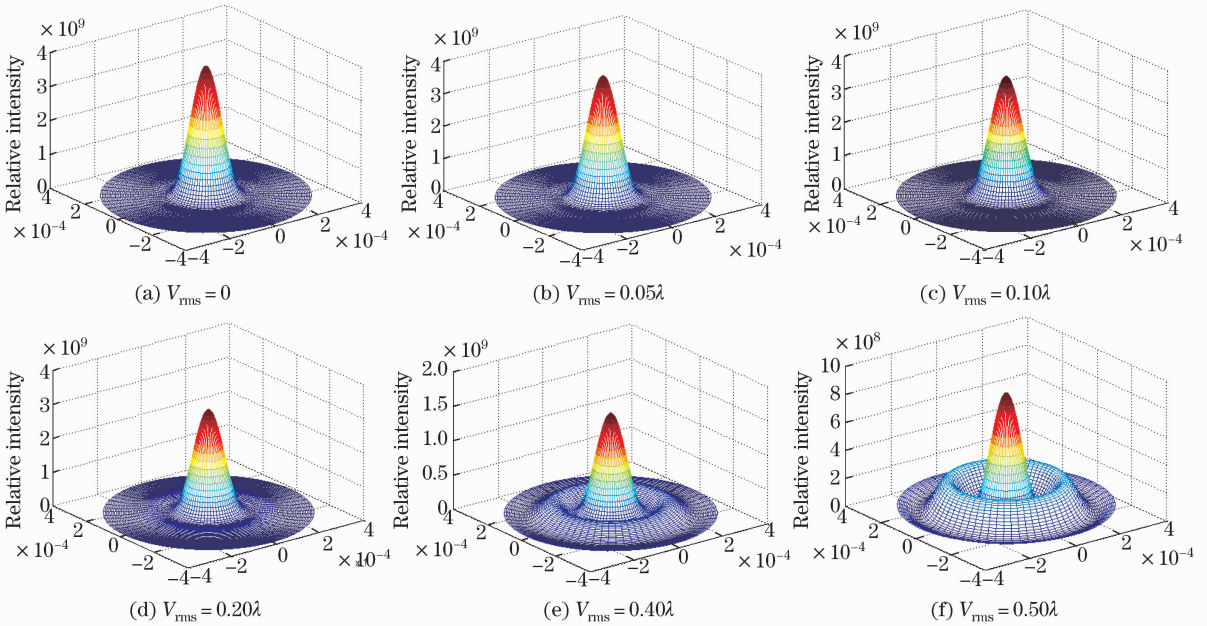


图 3 测试系统彗差对焦面光强分布的影响

Fig. 3 Influence of the measurement system coma aberration on the three-dimensional field distribution at focal plane

图 3 为测试系统存在的彗差均方根值分别为 $0.05\lambda, 0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.4\lambda, 0.5\lambda$ 情况下,端机出射光束在

CCD 探测器接收面上不同位置处的强度分布。由图 3 可知,随着测试系统彗差的增大,接收平面上光强峰值减弱,并且接收面上光强变为非旋转对称分布。测试系统存在彗差会使光强峰值发生偏移,而且随着测试系统彗差的增大偏移得越远。

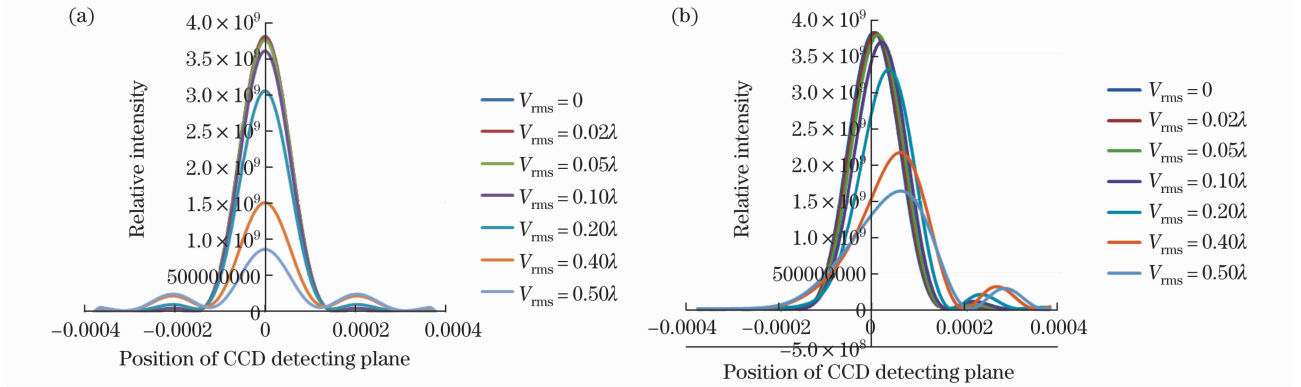


图 4 测试系统像差对焦面光强分布的影响。(a)球差;(b)彗差

Fig. 4 Influence of the measurement system aberrations on the two-dimensional field distribution at focal plane.

(a) Spherical aberration; (b) coma aberration

为了更清楚地看出 CCD 探测器接收面光强分布随测试系统像差的变化趋势,作 CCD 探测器接收面光强随测试系统像差大小变化的二维图。由图 4 可以得出当像差的均方根值为 0.02λ 时,焦面光强的最大值偏差小于 0.2% ,当像差的均方根值为 0.05λ 时,焦面光强的最大值偏差小于 1.4% 。

4 长焦测试系统设计

目前空间光通信端机通信工作波段主要分为 0.8 、 1.064 、 $1.55 \mu\text{m}$ 三个主要通信波段,且其通光口径最大为 260 mm ,因此测试系统的有效口径取为 300 mm ,根据第 3 节的分析结果,长焦系统的焦距取为 $f = 20 \text{ m}$,长焦测试系统的均方根波前误差优于 $\lambda/50$,确定的主要设计指标如表 1 所示。

表 1 长焦测试系统主要技术指标

Table 1 Specifications of the double-channel telescope system

Parameter	Requirement
Clear aperture	300 mm
Operating wavelength	800~1700 nm
Focal length	20 m
Aberration	$\lambda/50$ (RMS)
Field	0.2°

长焦测试系统视场不大, F 数较小,采用反射式结构可以优先考虑的是卡塞格林两镜系统。由于不能存在中心遮拦,长焦系统是在卡塞格林共轴两镜系统基础上优化而得到的,用两镜系统理论求出共轴两反系统初始数据,再将入瞳偏离量设为 180 mm 。将数据代入 Zemax-EE 软件,经过优化和调整,光学系统设计结果如图 5 所示。

图 6 为长焦测试系统中心视场的波像差图,中心视场波差峰-谷(PV)值为 0.0004λ ,RMS 值为 0.0001λ 。图 7 为长焦测试系统轴内外视场点列图,从图 6 可知, 15 mm 像方线视场范围内,依然可以保证非常好的像质。

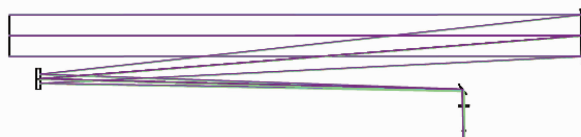


图 5 系统结构

Fig. 5 Layout of two-mirror optical system

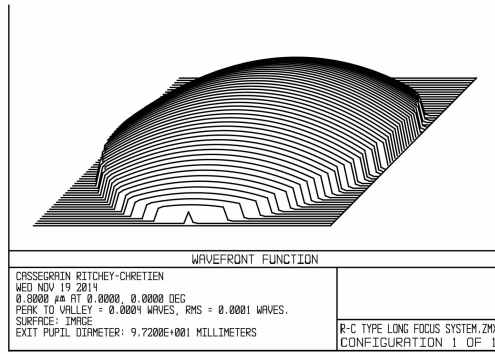


图 6 测试系统中心视场波前

Fig. 6 Wavefront map of the measurement system

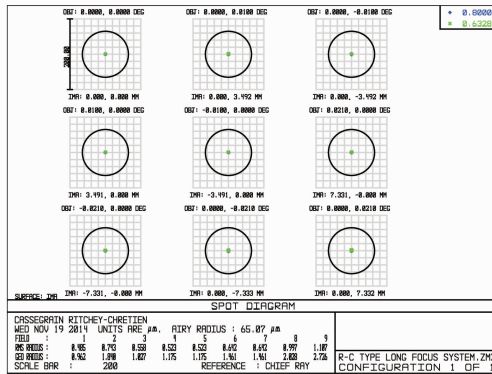


图 7 光学天线系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of the measurement system

5 长焦测试系统测试实验

安装调完成后的远场测试系统如图 8 所示,采用平行光管作为测试光源,平行光管的光源采用 808 nm 光纤输出激光器,因此输出的平行光可以看作是理想平行光,另外通过孔径光阑的开口大小限制出射光束的口径。



图 8 远场测试系统实物照片

Fig. 8 Photograph of the measurement system

在 CCD 探测器面上接收到的光斑为艾里斑,如图 9 所示。采用 Matlab 软件对图像进行滤波、边缘探测计算得到艾里斑的暗环半径,同时理论计算了艾里斑暗环的半径结果,如表 2 所示。从表中可以看出实际测量结果和理论计算相差不大。

经过分析表明,端机远场分布测试系统误差主要由光斑直径和长焦测试系统的焦距测量误差决定,主要因素包括长焦测试系统的焦距标定误差、自身像差、CCD 探测器的自身分辨率、焦面定位误差、CCD 探测器面倾斜、实验室杂散光、振动、气流扰动等环境因素的影响。利用光电经纬仪可以对长焦测试系统的焦距进行精确测量,可计算得到焦距测量误差对系统的影响约为 0.8%,长焦系统的像差可以利用激光干涉仪测量得到,系统光学质量达到衍射极限时对测试系统的影响很小。CCD 探测器的自身像元大小为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,

引入的定位误差为 $7.4 \mu\text{m}$, 可以计算得到引入的不确定度为 1.5% 。利用激光干涉仪进行 CCD 探测器面的精确定位, 经过实验测试, 焦面定位精度、CCD 探测器面倾斜对系统的影响约为 0.6% 。通过采用遮光板、遮光罩等措施抑制系统杂散光, 利用自平衡隔振平台减小振动影响, 可以计算得到测量值不确定度约为 2.0% , 端机远场分布测试系统的不确定度如表 3 所示。

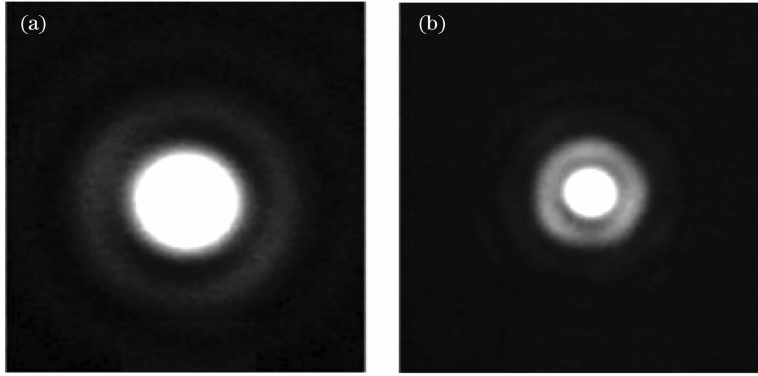


图 9 焦面光斑。(a) $D=50 \text{ mm}$; (b) $D=100 \text{ mm}$
Fig. 9 Focus spot. (a) $D=50 \text{ mm}$; (b) $D=100 \text{ mm}$

表 2 光斑暗环理论位置和实测位置

Table 2 Theoretical and experimental values of the dark ring diameters

	$D=50 \text{ mm}$			$D=100 \text{ mm}$		
	First dark ring	Second dark ring	Third dark ring	First dark ring	Second dark ring	Third dark ring
Theoretical value / μm	785.0	1434.9	2084.8	392.5	717.5	1042.4
Experimental value / μm	795.5	1460.2	2123.5	398.8	730.6	1064.8
Absolute error / μm	10.5	25.3	38.7	6.3	13.1	22.4
Relative error / %	1.34	1.76	1.86	1.61	1.83	2.13

表 3 远场分布测量不确定度

Table 3 Uncertainty in far field distribution measurement

Uncertainty Component	Relative standard uncertainty / %
Focal length precision	0.8
System aberration	0.1
Determining focal plane	0.6
CCD pixel size	1.5
Tilt angle of CCD	0.5
Stray light, vibration, atmosphere disturbance	0.6
Combined uncertainty	2.0

6 结 论

分析了基于透镜的傅里叶变换特性实现空间光通信端机远场分布测试原理, 以球差、彗差为代表分析了测试系统自身像差对焦面光强分布的影响, 由结果可以看出球差主要影响最大光强, 其分布仍然保持旋转对称性, 而彗差不仅使得光强峰值减弱, 且接收面上光强变为非旋转对称分布, 当系统像差均方根值小于 0.02λ 时, 最大光强的变化小于 0.2% , 可以忽略不计。基于以上分析, 设计了离轴卡塞格林长焦系统, 利用 Zemax-EE 对系统进行了分析, 分析结果表明, 在整个工作波段 ($800 \sim 1700 \text{ nm}$) 内, 中心视场 RMS 值为 0.0001λ , 全视场点列图均远优于衍射极限, 完全满足要求。对研制完成的远场分布测试系统进行了测试, 得到的光斑暗环实际值与理论值的误差均在 2.2% 以内。研制完成的远场分布测试系统能够较为准确地测量实际的通信系统远场分布, 可以满足空间光通信系统研制过程中的校准需要, 提供必要的性能评估与验证。

为系统改进提供依据,对促进我国空间光通信技术的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 V W Chan. Optical space communication [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6(6): 959-975.
- 2 Z Sodnik, H Lutz, B Furch, *et al.*. Optical satellite communications in Europe [C]. SPIE, 2010, 7587: 758705.
- 3 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *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.
- 4 M Toyoshima, T Fukazawa, M Toyoda, *et al.*. Evaluation of far-field pattern of laser transmitter onboard the laser communication equipment [C]. SPIE, 1997, 2990: 276-286.
- 5 K Inagaki, M Nohara, K Araki, *et al.*. Free-space simulator for laser transmission [C]. SPIE, 1991, 1417: 160-169.
- 6 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.
- 7 S Y Teng, L R Liu, J F Zu, *et al.*. A simulative technique to measure beam transmission of in-satellite communications [C]. SPIE, 2003, 5160: 417-421.
- 8 Wang Jianmin, Wang Lili, Xu Quan, *et al.*. Analysis of the far field distribution measurement of the terminals of free space laser communication and the measuring system design [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2008, 19(11):1467-1473.
王建民, 王丽丽, 徐 泉, 等. 卫星激光通信端机远场分布测试分析及测试系统设计[J]. 光电子•激光, 2008, 19(11):1467-1473.
- 9 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 2005: 47-55.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社, 2005: 47-55.

栏目编辑: 吴秀娟