

光通信中激光发散小角度远场焦斑测量法

郭 瑞, 杨华军, 胡 渝, 伍振海, 江 萍

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】根据激光发散角经准直后的微小角度的测量理论,提出了采用远场焦斑和CCD进行快速准确的测量方法,最后实际测出了激光准直后的远场发散角。实验证明:采用该方法可以达到空间光通信的激光发散小角度微弧度量级的要求,并且所带来的误差小于国际标准组织规定的最大值。

关键词 小角度测量; 空间光通信; 远场焦斑法; 电耦合器件

中图分类号 TN247

文献标识码 A

Far-field Focus Facula Measurement Method Concerning Small-angle of Laser Divergence in Optical Communication

GUO Rui, YANG Hua-jun, HU Yu, WU Zhen-hai, JIANG Ping

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract The key technique in optical communications is the narrow beam orientation. According to the small-angle measurement theory of laser alignment system divergence, an accuracy and high-speed measuring method using Charged Couple Device (CCD) is proposed to measure far-field focus facula. The far-field divergence of laser alignment systems is measured experimentally. The results demonstrate that the error produced by this method is less than the maximum of International Standardization Organization.

Key words small-angle measurement; space optical communication; far-field focus facula; charged couple device

与微波通信相比,空间光通信的一个显著特点就是发射光束窄。光束发散角减小,能够有效地利用激光能量,降低对系统发射功率和接收灵敏度等方面的要求,实现长距离的保密通信。但发散角过小,往往又造成光束的捕获跟踪困难、捕获时间长。对于一个具有搜索、捕获和跟踪(APT)功能的半导体激光通信系统,常采用信标光和信号光分离的方法。考虑到通信距离、光电器件、系统通信可靠性、光源准直难易程度等多种因素的影响,空间光通信系统信号光的发散角一般设计为零点几弧度。因此,经准直后的激光发散角大小是影响空间光通信系统性能的一个重要参数,如何在地面条件下模拟长距离空间环境,进行微小角度的精确测量就显得十分重要。激光发散角的测量一般不在近场进行,因为任何光强模式的角度分辨率随着发散距离的增加而增加^[1],因而,发散角也应该是指远场条件下测量得到的。但是,由于空间光通信长距离上存在的光束漂移和大气抖动的影响,对进行远场测量必然带来误差。为此,本文提出一种把电荷耦合器件(Charged Couple Device, CCD)用于远场焦斑测量的方法,从而可以实现快速、精确的近场模拟远场测量。

1 测量原理

1.1 远场发散角常规定义

通常将在激光器输出镜附近得到的激光光斑称为“近场图样”,满足条件: $z < d^2/\lambda$,其中, d 是光源孔径。而离激光器较远处或在一个长焦距透镜焦平面上得到的光斑称为“远场图样”,满足条件: $z \gg d^2/\lambda$ ^[2]。标准高斯光束的远场发散角为:

收稿日期:2005-10-14

基金项目:国防科研基金

作者简介:郭瑞(1980-),女,硕士,主要从事光通信及光学专业方面的研究。

$$2\theta = 2\lambda / (\pi\omega_0) \quad (1)$$

原则上,只要测得束腰光束半径,就能计算出发散角。但是,对于半导体激光器,实际经准直后的输出光束很少是标准的高斯型,因此一般不用式(1)测量。

1.2 远场焦斑法

焦斑法同样可以满足远场的条件。当激光束通过焦距为 f 的长焦距透镜,在其焦平面上可测得焦斑直径,则远场发散角为^[3]:

$$\theta = D/f \quad (2)$$

可见,远场焦斑法测量远场发散角的关键是要求出聚焦透镜上的焦斑直径。高斯光束强度衰减到中心光强的 $1/e^2$ (13.5%) 时的横向尺寸定义为其光束直径。其光强分布为:

$$I = I_0 e^{-2r^2/\omega_s^2} \quad (3)$$

式中 I_0 为光斑中心处的光强; I 为距离中心 r 处的光强; ω_s 为光斑尺寸。

1.3 焦斑半径的测量

“ISO标准”认可的束宽测量方法中,针孔装置由于稍微引起较大的束宽测量误差,一般很少采用;狭缝扫描装置狭缝宽度为被测束宽的1/10以下才不致引起较大的测量误差。而CCD作为探测传感器,它能够实时显示出整个光斑点轮廓,可用于连续和脉冲激光的测量,克服了传统测量的繁杂过程,并用计算机进行控制和数据处理,大大提高了测量精度。实验原理如图1所示,图中,A是经准直后的半导体激光器,L是聚焦透镜,分束板处为焦斑位置,聚焦后的光束经分束板分为互相垂直的两束光,分别照射在 x 方向和 y 方向上设置的CCD探测器上,由CCD输出一列幅度受光信号调制的脉冲信号,经过图像处理和计算机控制的自动采集系统,再经A/D转换,输送到计算机中进行数据处理,最后由打印机打印出测试结果。

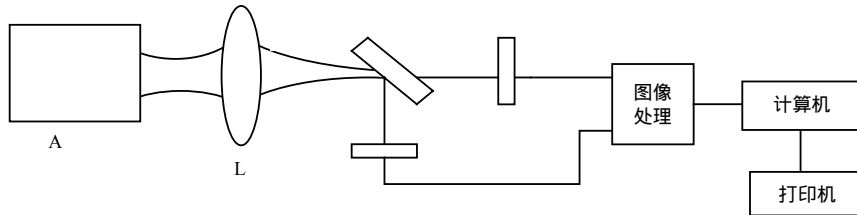


图1 实验装置图

当激光束经过分束器分为两束光,分别照射到 x 方向和 y 方向设置的CCD器件上时,如图2a、2b所示,传感器接收到沿 x 轴和 y 轴的光强根据式(3)分别为:

$$I_x = I'_0 \exp\left[-2\frac{(a_1 - x)^2 + d_1^2}{\omega_s^2}\right] \quad (4)$$

$$I_y = I''_0 \exp\left[-2\frac{(a_2 - y)^2 + d_2^2}{\omega_s^2}\right] \quad (5)$$

式中 I'_0 和 I''_0 分别为分束后的 x 方向和 y 方向光斑中心的光强; d_1 和 d_2 分别为光斑中心到 x 轴和 y 轴的垂直距离; a_1 、 a_2 分别为 x 轴原点 O_1 和 y 轴原点 O_2 到光斑中心的垂直距离; O_1 和 O_2 分别为沿 x 轴和 y 轴放置的CCD起始光敏位置。

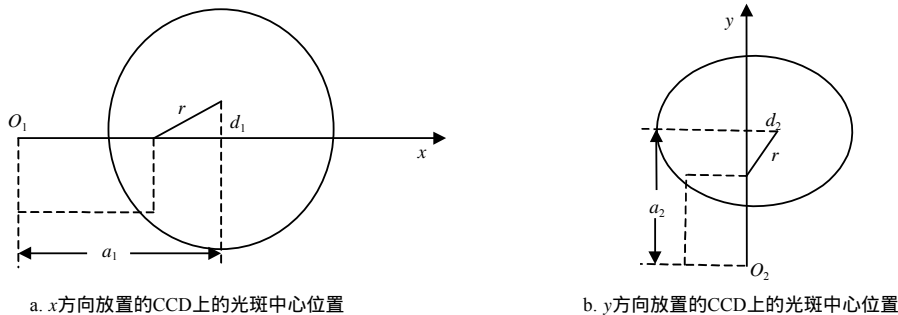


图2 光斑中心在CCD的位置

将式(4)、(5)两边分别除以 I'_0 和 I''_0 , 可以得到相对光强的分布:

$$\frac{I_x}{I'_0} = \exp\left[-2\frac{(a_1 - x)^2 + d_1^2}{\omega_s}\right] \quad (6)$$

$$\frac{I_y}{I''_0} = \exp\left[-2\frac{(a_2 - y)^2 + d_2^2}{\omega_s}\right] \quad (7)$$

将沿x轴和y轴上的CCD接收到的光强信号通过图像处理和A/D转换, 根据式(6)、(7)由计算机进行数据处理和曲线拟合^[4], 得到x方向和y方向激光束横向相对光强分布曲线。

由式(3)可知光斑尺寸 ω_s 是激光光强 $I_x = I_0/e^2$ 时的 r 值, 相对光强则为 $I = 1/e^2$ 时的 r 值。因此, 计算机可以计算出相对光强分布拟合曲线中光斑尺寸 ω_s 的值。

2 实验测量结果及误差分析

2.1 实验测量结果

本文使用上述方法设计的测量装置对经准直聚焦后的激光器的光斑尺寸进行测量, 实验中设定透镜焦距为1 m, 再根据式(2)(其中的聚焦光斑 $d = 2\omega_s$), 所得焦斑尺寸和发散角的数据如表1所示。

2.2 误差分析

根据式(2)对测量误差进行分析, 将式(2)进行微分后得到:

$$\Delta\theta = \Delta d / f + d\Delta f / f^2 \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, 测量误差 $\Delta\theta$ 来源于 Δd 和 Δf , 但第2项中, d 是微弧度量级, 而 f 是米量级, 第2项相对于第1项可以忽略不计, 即

$$\Delta\theta = \Delta d / f \quad (9)$$

经分析, 引起光斑误差由以下因素引起: (1) CCD有限分辨率带来的误差 σ_1 ; (2) CCD定位聚集位置带来的误差 σ_2 ; (3) CCD暗电流带来的误差 σ_3 ; (4) 功率波动带来的误差 σ_4 。因此, 总误差:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4} \quad (10)$$

在本文的实验条件下: $\sigma_1 = 0.6\%$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 6\%$, 采用的半导体激光器功率偏差为10%, 再通过6次测量取平均值, 则得到功率波动误差 $\sigma_4 = 0.01\%$ 。所以根据式(10)可得, 实验带来的总误差是 $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{0.6^2 + 0 + 6^2 + 0.01^2} = 6.03\%$ 。国际标准组织规定的光束质量误差在10%以内, 可见, 用本文的方法引起的误差小于ISO规定的最大标准。

3 结束语

在分析了激光准直后的远场发散小角度的测量原理基础上, 设计了实验装置系统, 并进行了实际测量, 对结果进行了误差分析。分析表明: 采用焦斑法进行测量的优点: (1) 实现远场测量; (2) 聚焦后的光束漂移较小, 给测量带来方便; (3) 降低了由限制孔径引起的衍射效应对远场束宽测量的影响。同时CCD的采用对测量椭圆光斑很有优势, 它的实时显示能力在工程控制上很有用, 使测量变得更为简便易行和稳定可靠, 减少了误差, 大大提高了测量精度, 满足了空间光通信对微弧度量级远场发散角度要求。

参考文献

- [1] Derrick P, Jeff G. New approach improves far-field measurements[J]. Laser Focus World, 2001, 7: 149-152.
- [2] 林殿阳. 光电子技术分册[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 2003.
- [3] 陈长水, 谢建平, 王佩林. 焦点刀口法测量巨脉冲激光的光束发散角[J]. 量子电子学报, 2001, 18(1): 38-40.
- [4] Roundy K. Propagation factor quantifies laser beam performance[J]. Laser Focus World, 1999, 12: 119-122.

编辑 孙晓丹

表1 测量结果

次数	激光焦斑尺寸 $\omega_s/\mu\text{m}$	激光发散角 $\theta/\mu\text{rad}$
1	230	460
2	229	458
3	228	457
4	230	460
5	231	462
6	229	459
平均值	229.5	459.5