

文章编号: 0258-7025(2008)04-0555-04

# 一种测量激光束横模结构的非线性网络

沈金华 王石语 过 振 文建国 蔡德芳

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 提出以激光束的横模结构特别是基模所占的比例作为激光光束质量的评价依据,并研究了测量方法。建立了基于 Hopfield 神经网络原理的非线性网络,使用 CCD 采集激光束的光斑图像作为网络的输入,通过计算该网络的能量函数,实行调整训练,获得网络的动力学稳定状态,此时网络中各阶横模的比例即为测量结果。实验采集了一束光的多幅光斑图像,经预处理后输入该网络,可获得模式结构数据,其中基模分量为 69%。利用所得结果合成一幅光斑,与输入的原光斑图像的相对误差为 3.53%。

**关键词** 测量;激光束;横模;非线性网络;CCD

**中图分类号** TN 241 **文献标识码** A

## Nonlinear Network of Measuring Transverse Modes in a Laser Beam

Shen Jinhua Wang Shiyu Guo Zhen Wen Jianguo Cai Defang

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** The distribution of transverse modes of the laser, especially the ratio of fundamental mode is proposed to evaluate laser beam quality, and the measuring method is studied. The beam spot images captured by a CCD detector are input into a nonlinear network which bases on the Hopfield network principle. The dynamics steady state is obtained by computing the energy function of the network and performing training arrangement. The proportion of all ranks of transverse mode in the steady state is the measurement result. During the experiment, a laser diode-pumped solid-state laser was used to emit laser beam, and the captured beam spot images were input into the nonlinear network after image processing, and the proportion of fundamental mode was 69%. The results were used to compose a new spot digital image, and the relative error compared the original image was 3.53%.

**Key words** measurement; laser beam; transverse mode; nonlinear network; CCD

## 1 引 言

激光光束质量的评价参数是判断激光器实际性能的综合指标,广泛应用于激光系统的设计、检验和维护。常用的激光光束质量评价参数有光斑半径、远场发散角、包围能量比、斯特列尔比、衍射极限倍数因子  $M^2$  以及其倒数因子(光束传输因子)等<sup>[1~4]</sup>。通常根据应用场合的特点选择不同的参数对光束质量进行描述。在激光器的研制中,为了改善光束质量,经常需要对其高阶横模进行限制。为了获得好的输出光束,应尽量使激光器运行于低阶模。如果

能用激光束的横模结构来描述激光器的输出光束质量,则可以直接反映激光器研制中所采用的模式限制技术的优劣。

而在很多实际应用中,人们对基模在光束中所占的比例更为关心,因此提出以激光束中的基模所占的比例作为激光光束质量的一个评价参量。但采用此参量的困难主要表现在很难精确、快速地测量实际光斑的各阶模式。因此,本文提出了一种采用 CCD 测量,结合神经网络快速识别模式的方法。

收稿日期:2007-06-21; 收到修改稿日期:2007-11-02

基金项目:国家重点实验室基金(51438010205DZ0101)资助项目。

作者简介:沈金华(1982—),男,江苏人,硕士研究生,主要从事激光二极管抽运激光器横模结构的研究。

E-mail: sjhblues@yahoo.com.cn

导师简介:王石语(1966—),男,陕西人,教授,博士生导师,主要从事新型激光器件与技术的研究工作。

E-mail: yshi@mail.xidian.edu.cn

## 2 测量横模分量的方法

目前常见测量横模分量结构的方法<sup>[5]</sup>主要是先由谐振腔理论计算各阶单横模分布,借助扫描干涉仪测量激光模谱,再经分析与光斑模拟,最后可得各横模的相对强度;其缺点是步骤复杂,测量误差与激光器的频率稳定性有关,在实际应用中通过谐振腔理论计算各阶单横模光强分布也有很大困难。而利用 CCD 成像技术,测量衍射极限倍数因子  $M^2$  的方法已经广泛应用<sup>[6,7]</sup>。

为了便于实际应用,本文采用了一种新的方法。首先利用数码相机或 CCD 采集光斑的强度分布信息;然后利用非线性网络对光斑的横模结构进行估计。所用非线性网络采用了神经网络中的 Hopfield 网络<sup>[8]</sup>演化过程的算法,利用该算法对所估计的参数进行最优化调整。调整的原则是:当估计的各阶横模分量与实际情况相符时,各阶横模的理论合成图应与所采集的光斑强度分布图有尽量小的误差。

模式识别中所采用的网络是一种单层反馈性非线性网络,如图 1 所示。图 1 中  $I$  所在的输入端口为实际光斑强度分布的输入端口,  $I_0, \dots, I_i, \dots, I_n$  所在的端口为经归一化的第  $i$  阶拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian)光束的光强分布的输入端口。端口  $-1$  为实际光斑提供权值因子  $-1$ ,  $x_i$  为  $I_i$  的权值因子,满足  $x_i \in [0, 1]$ ,  $\sum_{i=0}^n x_i = 1$ 。 $w$  为各个光斑输入端口设定基模光斑半径,  $w$  的初始值由外部输入。 $I$  和  $I_0, \dots, I_i, \dots, I_n$  以相应权值进行合成,成为  $F$  函数所在节点的输入值,  $F$  节点的输出

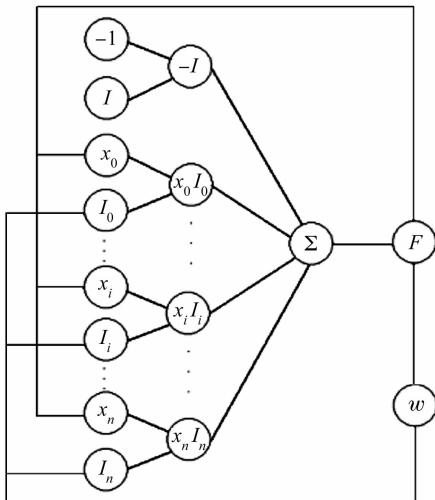


图 1 网络结构

Fig. 1 Structure of the network

$$F = \sum_x \sum_y \left[ \sum_{i=0}^n x_i I_i(x, y) - I(x, y) \right]^2, \quad (1)$$

式中,将  $F$  值反馈到  $x_0, \dots, x_i, \dots, x_n$  所在的端口,按照一定的算法动态调整权值因子  $x_i$  使  $F$  达到一个稳定值; $w$  的值也由  $F$  的反馈值进行动态调整。

引入反馈后,上述网络即是一个非线性动力学系统。网络调整的思想是获得一个稳定性的网络状态,即通过恰当的网络运算,使  $F$  函数达到稳定的极小值。这就要求所采取的算法随着时间的推移,推动网络状态向  $F$  减小的方向移动,以保证最后到达  $F$  极小值,即网络的稳定平衡状态。

## 3 网络的稳定性分析及具体算法

采用 Hopfield 神经网络的算法来完成网络的动态调整,这也是赋予网络的一个动力学过程。以此为基础,对该网络动力学过程的稳定性进行分析。

这里只讨论轴对称激光系统,其激光器输出光束是拉盖尔-高斯光束,定义动力学能量函数为

$$E(X) = F = \sum_x \sum_y \left[ \sum_{i=0}^n x_i I_i(x, y) - I(x, y) \right]^2, \quad (2)$$

该函数由  $F$  所在端口输出。设计变量  $\mathbf{X} = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ , 采用梯度下降法或其改进算法完成网络训练,迭代公式为

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - f[\mu_k(t) \nabla E_X(\mathbf{X})], \quad (3)$$

式中  $\mu_k(t)$  为训练步长,  $f[\mu_k(t) \nabla E_X(\mathbf{X})]$  为  $\mu_k(t) \nabla E_X(\mathbf{X})$  在约束条件平面  $\sum_{i=0}^n x_i = 1, x_i \in [0, 1]$  的投影,则具体的迭代方程为

$$\frac{dx_i}{dt} = -\mu_k(t) \frac{\partial E(X)}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}^0, \quad (4)$$

训练步长  $\mu_k(t) > 0$ ,  $\mathbf{X}^0$  为初始估计值,对能量函数求时间导数

$$\frac{dE(X)}{dt} = \sum_{i=0}^n \frac{\partial E(X)}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = - \sum_{i=0}^n \frac{1}{\mu_k(t)} \left( \frac{dx_i}{dt} \right)^2, \quad (5)$$

因为  $\mu_k(t) > 0$ ,  $\frac{dE(X)}{dt} \leq 0$ , 即能量函数随时间而减小,根据能量函数稳定性理论<sup>[8]</sup>可知,该系统是渐进稳定的。

在以上分析的基础上,该非线性网络利用以下步骤确定各阶横模分量值的比例:

1) 对网络进行初始化:由  $I$  端口输入实际光斑

的光强分布矩阵；同时给定一个  $\omega$  的输入值，按经验确定横模个数并由此决定网络节点的数目，如果事先不了解横模结构，可由谐振腔理论计算出可能存在的最高阶模式，以此确定横模个数。

2) 由  $\omega$  确定各阶横模的光强分布函数  $I_0, \dots, I_i, \dots, I_n$ ，随意按约束条件给变量  $X$  中各元素赋两个初值，根据(2)式分别计算两组初值对应的能量函数及其之差  $dE$ ；

3) 由(4)式计算出  $\Delta X = (dx_0, dx_1, dx_2, \dots, dx_n)$ ，接着计算出  $\Delta X$  在约束条件下平面的投影  $\Delta X'$ ，按(3)式计算出新的变量  $X$ ；

4) 计算出此时的能量函数  $E$  及其与上一时刻能量函数之差  $dE$ ，若  $|dE/E| < \delta$  ( $\delta$  为给定的接近于 0 的正数)，迭代结束；否则转第 3) 步；

5) 此时可以认定能量函数达到阶段极小值记为  $F$ ，若  $F$  小于期望误差，转第 6) 步，否则按照使  $F$  值减小的方向调整  $\omega$  转第 2) 步。

6) 结束程序，此时  $X$  中各元素值就是各阶横模分量的最终值。

图 2 是在一次实际运算中，获得的误差函数  $F$  随  $\omega$  值的变化关系，其中最小误差所对应的  $\omega$  可认为在实际光斑中基模部分的光斑半径。经此非线性网络处理后，所得结果的误差包括系统误差和随机误差，系统误差主要是在测量光斑的过程中由 CCD 光强响应饱和及背景杂散光引起的；随机误差主要是由网络中取整舍入的影响造成的。

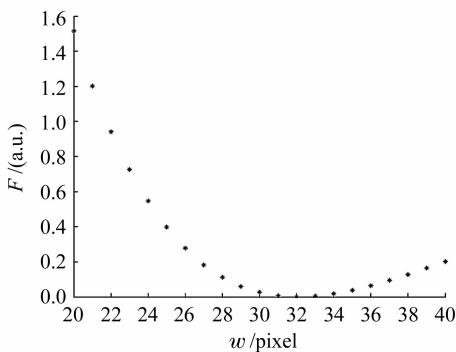


图 2 误差函数与基模光斑半径的关系

Fig. 2 Variation of the error function  $F$  versus the fundamental mode radius  $\omega$

## 4 应用及结果

将本文的方法用于对实际光斑进行分析，主要步骤为：

- 1) 采集激光光斑；
- 2) 对采集图像进行一系列的预处理得到灰度

图；

3) 用非线性网络对其进行训练得到各横模的相对强度。

采集光斑时，有两种方式，一是直接将激光打到 CCD 的探头上，二是将激光打到光屏上，由 CCD 采集光屏上的光斑。为了防止光强响应饱和，实验采取了第二种方式，此时要注意消除背景杂散光的影响。在实际处理过程中，在确定 CCD 的分辨率的情况下，发现图像尺寸小于光斑直径的 3 倍时，网络稳定时的误差有加速扩大的趋势；而大于 3 倍时，误差难以进一步缩小，所以一般调整 CCD 使采集图像的尺寸为光斑直径的 3 倍左右。图像预处理的目的在于获得更精确的光强相对分布，减小背景噪声的影响。本文所涉及的预处理主要是去除采集图像中的噪声，采用的方法主要是图像相减、二维维纳滤波、低通滤波等<sup>[9]</sup>。

实验所用激光器为激光二极管端面抽运固体激光器。图 3 为直接利用 CCD 采集到的 8 位灰度图像，由其三维分布可以看出背景噪声的影响比较大；图 4 为利用图像相减的办法（即用原图减去一幅同背景无光斑的图像）除去背景噪声之后的图像。

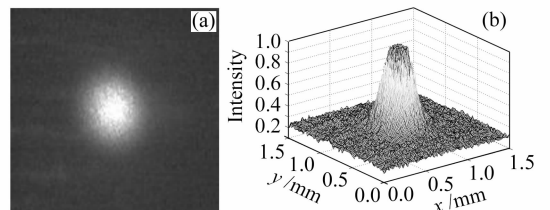


图 3 CCD 实测光斑图像(a)及其三维强度分布(b)

Fig. 3 A beam spot image captured by CCD (a) and its three-dimensional (3D) intensity distribution (b)

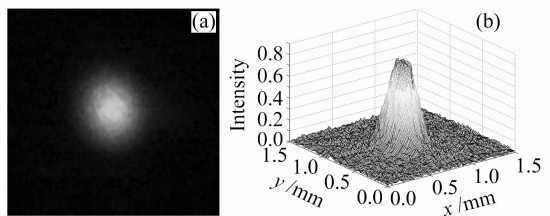


图 4 经图像处理后的光斑图像(a)及其三维强度分布(b)

Fig. 4 Beam spot image after image processing (a) and its 3D intensity distribution (b)

经训练后网络稳定状态的结果如表 1 所示，可见基模  $I_{00}$  所占比例为 69%，误差函数  $F$  值为 0.007041，此时  $M^2$  为 1.80。

图 5 为经网络处理后合成光斑图像与输入光斑图像的径向归一化光强分布图，可见两者从中心到

中心光强  $1/e^2$  处的相对误差为 3.53%，可认为完成训练目标。从采集图像预处理，输入网络，至网络达稳定状态，在 2.4 G 处理器上共耗时 15 s 左右。

表 1 横模分量的归一化强度系数

Table 1 Normalized power coefficients of transverse modes components

$I_{00}$	$I_{01}$	$I_{10}$	$I_{20}$	$I_{02}$	$I_{11}$
0.69	0.00	0.06	0.07	0.00	0.00
$I_{30}$	$I_{03}$	$I_{12}$	$I_{21}$	$I_{22}$	
0.06	0.00	0.00	0.01	0.10	

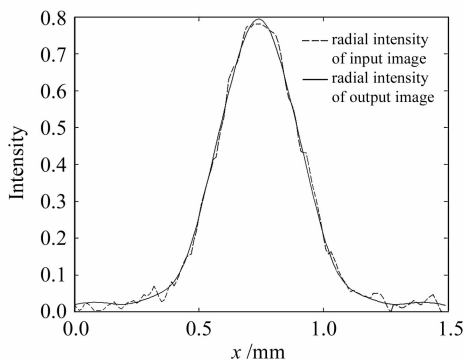


图 5 经网络处理后合成光斑图像与输入的光斑图像径向光强分布比较

Fig. 5 Comparison of the radial intensity distribution between the input spot image and the output spot image of the network

## 5 结 论

提出以激光束的横模结构特别是基模所占的比例作为激光光束质量的评价依据。建立了基于 Hopfield 神经网络原理的非线性网络，获得了网络的动力学稳定状态。实验结果表明，采集一束光的多幅光斑图像，经预处理后输入该网络可获得模式结构数据，其中基模分量为 69%。利用所得结果合成一幅光斑，与输入的原光斑图像的相对误差为 3.53%。测量激光光斑横模结构的方法，实验操作简

单、网络运算速度快、识别精度高，可在激光器的研制中实时判断激光的光束质量，对于提高激光器光束质量，特别是控制激光器的高阶模式有重要价值。

## 参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman. Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(5):1146~1148
- 2 A. E. Siegman, S. W. Townsend. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4):1212~1217
- 3 Yang Huanxiong, Zhao Daomu, Lu Xuanhui *et al.*. Several viewpoints related to the beam quality factor [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8):709~715  
杨焕雄, 赵道木, 陆璇辉等. 关于光束质量因子  $M^2$  的几点看法 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(8):709~715
- 4 Lu Wei, Liu Liren, Sun Jianfeng *et al.*. Phase-space product of beam from Gaussian Schell-mode source by using coherent-model representation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):471~476  
鲁伟, 刘立人, 孙建锋等. 相干模表示的部分相干高斯-谢尔光束的相位-空间积 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):471~476
- 5 Guo Ping, Huang Ningning. Analysis of transverse modes in a laser beam [J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(1):22~24  
郭屏, 黄宁宁. 激光束的横模分析 [J]. *激光与红外*, 2000, **30**(1):22~24
- 6 Yu Yong-ai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258  
于永爱, 张玲玲, 唐前进等. 激光束质量实时测量技术 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):255~258
- 7 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):641~645  
李特, 宁永强, 孙艳芳等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):641~645
- 8 J. J. Hopfield. Artificial neural networks [J]. *Circuits and Devices Magazine*, 1988, **4**(5):3~10
- 9 Gong Huaping, Lü Zhiwei, Lin Dianyong. CCD digital image preprocessing in measurement of laser beam intensity distribution [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(1):125~127  
龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光光强分布测量中 CCD 数字图像的预处理 [J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(1):125~127