

## 激光仿真系统中非理想光源的模拟方法

王 静<sup>1</sup>, 张 宇<sup>1</sup>, 吕 品<sup>1</sup>, 孙 全<sup>2</sup>

(1. 中国科学院软件研究所, 北京 100190;  
2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410000)

**摘 要:** 利用数值仿真的方法对激光系统进行研究时, 一般使用理想的平面波或高斯波作为光源, 而实际的激光传输系统光源通常不满足理想光束的条件, 甚至具有恶劣的光束质量, 从而造成仿真结果与实验结果存在很大的偏差。从波像差与光束  $\beta$  因子的关系出发, 讨论了非理想光束的一种数值模拟方法。该方法使用等效相位屏作为光源的初始像差, 等效相位屏的强度与待模拟光源的光束质量有关。将该方法分别应用到平面波和高斯波, 根据给定的  $\beta$  因子仿真出光源的光场, 然后计算光场的  $\beta$  因子并与设定值进行对比。结果表明: 该方法可以准确的模拟出具有给定  $\beta$  因子的光源。

**关键词:** 光源模拟; 光束质量;  $\beta$  参数; 等效相位屏

**中图分类号:** TN248.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3527-06

## Simulation method of non-ideal light source in laser system

Wang Jing<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>1</sup>, Lv Pin<sup>1</sup>, Sun Quan<sup>2</sup>

(1. Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

**Abstract:** The ideal plane-wave or gauss is often used as light source when studying laser system with numerical simulation. The actual light source for laser transmission system does not meet the condition of ideal light, even with poor beam quality, which results in the deviation in the simulation compared with experiments. Starting from the relationship between wave aberration and beam quality  $\beta$ , the numeric simulation method of nonideal beam was discussed here. The initial aberration was equivalent phase screen, which intensity was related with beam quality of the light simulated. According to the setting values of  $\beta$ , the optical field of light was simulated in the method, which was applied in plane-wave and gauss. Compared with setting values, the beam quality of optical field calculated shows that the method can simulate the light with certain beam quality.

**Key words:** light source simulation; beam quality;  $\beta$  factor; equivalent phase screen

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 科技部 863 计划(2012AA011206)

作者简介: 王静(1988-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事激光仿真技术方面的研究。Email: 570482274@qq.com

## 0 引言

对于激光系统的研究和探索,多采用传统的基于试验的方法,且具有研制周期长、费用高和风险不可控等问题。而仿真技术的发展为其提供了新的解决方法,并且随着仿真技术的发展,数值仿真在激光系统中所占的比重越来越大,发挥了越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。

在光学系统仿真中,光源对整个仿真系统各个组成部分,如光束控制、光束传播等都会带来深刻的影响,对于光源的建模与仿真成为不可或缺的一部分。对于实际不同类型的光源,受加工工艺、高温、模式控制等原因影响,往往造成其光束质量下降而不再是理想光束。并且,实际光场的复振幅难于测量,如何对光束质量下降的实际光束进行仿真是面临的一个新的问题。

以往对光源的仿真通常采用理想的平面波或高斯波,对于光束质量的研究,也多从测量方面进行不同指标的评价<sup>[2]</sup>,而对于一定光束质量的非理想光源的仿真,目前研究还比较少。文中将从仿真角度研究光束质量下降后造成的像差,以  $\beta$  因子为评价方法来模拟实际非理想光束,并对仿真结果进行分析验证,使结果能够满足仿真精度的要求。

## 1 光束质量的评价方法

对光束质量的定义,有多种不同的评价参数,如聚焦光斑尺寸、衍射极限倍数  $\beta$  因子、桶中功率和  $M^2$  等。对于平面波,如果以光束远场光斑的质心为中心,光斑半径  $r$  内的环围能量达到理想平面波远场光斑一级暗环  $R_0$  内的能量,则光量因束因子为:

$$\beta = \frac{R}{R_0} \quad (1)$$

对于仿真来说,光斑半径是等效值而非实测值,是由远场的光强分布计算而得,最为严格的计算光斑半径的方法为二阶矩法,但对于光强分布有离散的光斑,用二阶矩计算的光斑尺寸会与实际光斑相差很远。从仿真应用的角度,可以用套桶法计算光斑半径:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} I(r\cos\theta, r\sin\theta) r dr d\theta = 83.76\% \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I(r\cos\theta, r\sin\theta) r dr d\theta \quad (2)$$

这里,以平面波为例,能量比为83.76%。

## 2 实际光束不同光束质量模拟

### 2.1 不同光束质量平面波的模拟

鲜浩等<sup>[3]</sup>对各阶泽尼克系数下,平面波的波像差  $W$  与光束质量  $\beta$  的关系,用二次曲线进行了拟合。对于大气扰动造成的随机波前相位畸变,其 Zernike 模式系数的方差分布符合 Kolmogorov 谱的规律,对各阶泽尼克拟合曲线按方差分布加权求和,得到在不考虑整体倾斜的情况下,符合 Kolmogorov 谱的光束质量因子的拟合式:

$$\beta = 0.0299(D/r_0)^{5/3} + 0.451(D/r_0)^{5/6} + 1 \quad (3)$$

式中: $D$  为光瞳面口径; $r_0$  为相干长度。根据上式,在口径一定的情况下,可以得到平面波光束质量因子与  $r_0$  的关系,对应关系如图 1 所示。

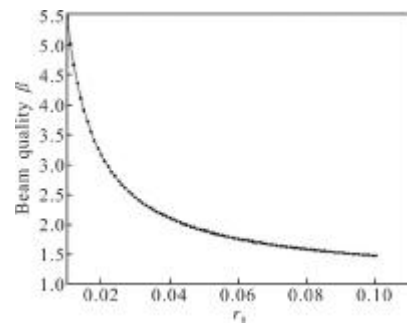


图 1 光束质量  $\beta$  与相干长度  $r_0$  对应关系

Fig.1 Relationship between beam quality  $\beta$  and coherent length  $r_0$

根据上述描述的光束质量与湍流相干长度的关系,能够计算出不同光束质量下对应的大气湍流相干长度。可以考虑用 Kolmogorov 谱相位屏来模拟实际光源近场复振幅引入的像差,利用对理想平面波叠加相位屏的方式,对不同光束质量的实际光源出光束进行等效。

通过仿真实验验证上述方法,表 1 列出了仿真条件,模拟波长为 532 nm,光束质量因子  $\beta$  为 4 的平面波。首先将  $\beta$  代入公式(3),计算相应的湍流相干长度  $r_0$ , $\beta$  值越大,相应的  $r_0$  越小;其次,由已知实验条件和求得的  $r_0$  生成 Kolmogorov 谱相位屏,并作为光源的初始相位;最后计算模拟光场的远场光斑并求解模拟结果的光束质量  $\beta$  因子,从而对结果进行验证。

表 1 仿真实验条件

Tab.1 Condition of simulation experiment

Parameter	Value
Wavelength/nm	532
Simulation size/m	0.4
Pupil diameter/m	0.1
Dim	256
$\beta$	4

图 2 为  $\beta$  为 4 时模拟光束的等效叠加相位和远场光斑。可以看出,叠加的等效相位已经让光束质量下降到一定程度。

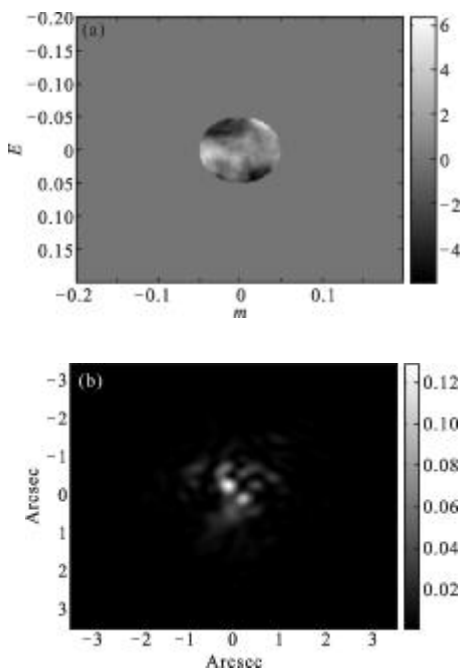


图 2  $\beta$  为 4 时叠加的等效相位和远场光斑

Fig.2 Equivalent phase and far field image when  $\beta$  is 4

根据对平面波光束质量因子  $\beta$  的定义,需计算实际远场光斑的等效半径。对于截面不对称的光斑,其横截面的光斑半径采用圆拟合的方法得到,即计算等效半径  $R$ ,使以  $R$  为半径、质心为中心的圆所包含的功率占总功率的 83.76%。对于质心的计算,在沿光轴方向的某一位置  $z$  处,如果光束截面功率密度分布为  $I(x,y,z)$ ,则功率密度分布的一阶矩给出了光束分布的质心位置坐标。

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy}$$

$$\bar{y} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (4)$$

由实际光束的远场光斑半径与理想光束的对比可以计算出光束质量因子  $\beta$ 。对上述  $\beta$  为 4 的情况,由模拟结果计算得到的光束质量因子<sup>[4-6]</sup>  $\beta$  为 5.450,与设置结果存在很大的差异。

增加仿真范围,设置  $\beta$  取值为 1.5~5,步长为 0.5。将模拟结果的  $\beta$  计算值和理论设置值进行对比,统计分析结果如图 3 所示,仿真统计次数为 30 次。设置值为所要模拟的光束质量取值,仿真结果为等效相位屏法模拟的实际仿真结果计算出光束质量。由图 3 可以看出, $\beta$  值较小时,仿真结果的光束质量因子比较贴近理论设置值,能够在其上下浮动。但是,当  $\beta$  增大时,仿真结果与理论结果相差越来越大。可见当  $\beta$  稍大时,对  $\beta$  和  $r_0$  关系式的拟合曲线已经不再准确。所以,用原来的二次曲线已经不能满足对  $\beta$  仿真精度的要求。

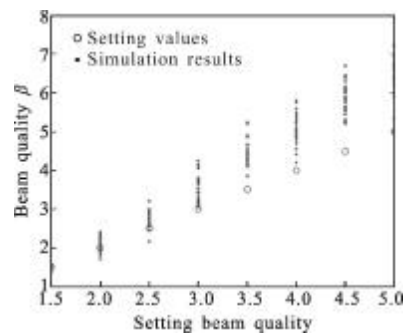


图 3  $\beta=1.5-5$  的仿真结果与理论对比统计结果

Fig.3 Statistic result of the comparison between simulation and setting values with the condition that  $\beta=1.5-5$

### 2.2 仿真结果修正

为解决上述问题,对方法做进一步改进,利用迭代算法如图 4 所示,对结果进行修正,步骤如下:  
(1) 给定一个  $\beta$  值,根据原二次拟合曲线求得初步的相干长度  $r_0$ ,计算相应的 Kolmogorov 谱等效相位

屏;(2) 以等效相位屏作为初始相位, 模拟非理想光束, 并计算远场光斑, 从而计算仿真结果的  $\beta$  值;(3) 在此基础上, 通过对比  $\beta$  的初始值与仿真计算结果, 不断对  $r_0$  的值进行上下微调, 计算新的等效相位屏;(4) 利用新相位屏重复步骤(2);(5) 如此反复迭代运算, 直到  $\beta$  的仿真精度达到一定要求。

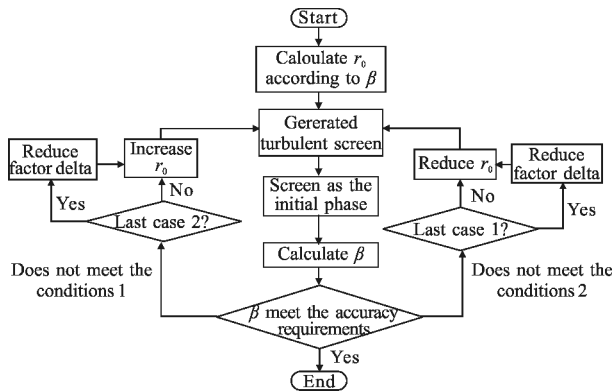


图 4 迭代修正算法

Fig.4 Improved iterated method

当  $\beta$  为 4, 设置精度为 0.01% 时, 利用上述修正方法, 得到结果如图 5 所示, 图中给出了仿真计算的  $\beta$  因子逐渐逼近理论设置值的过程, 迭代 7 次后仿真精度满足要求。

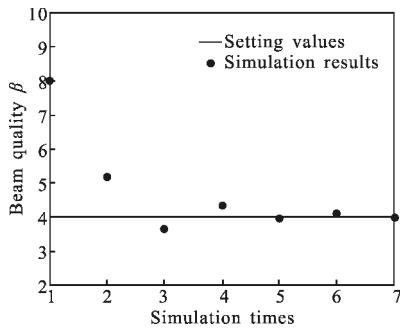


图 5 迭代算法收敛过程

Fig.5 Convergence of iterated method

同样, 设置仿真统计次数为 30 次, 仿真  $\beta$  从 1.5~5 情况, 修正后的仿真结果如图 6 所示。从图中可以看到, 光束质量很恶劣的情况下, 仿真结果与理论设置值也能达到很好的吻合程度, 并且可以根据需要设置仿真精度, 图中精度为 2%。此外, 随着光束质量的下降, 仿真结果与理论设置值的相对抖动越来越严重, 是因为仿真设置精度是相对于  $\beta$  而言的。仿真精度越高, 所需迭代次数越多, 耗时越多。

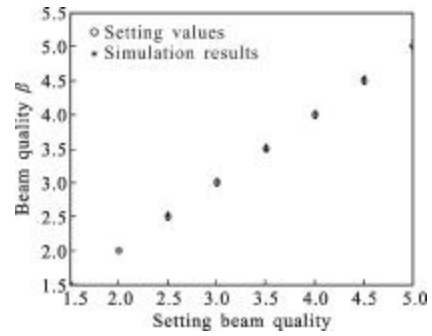


图 6  $\beta=1.5-5$  条件下修正后的统计结果

Fig.6 Statistic result after corrections under the condition with  $\beta=1.5-5$

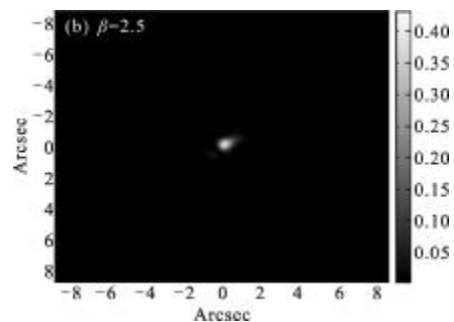
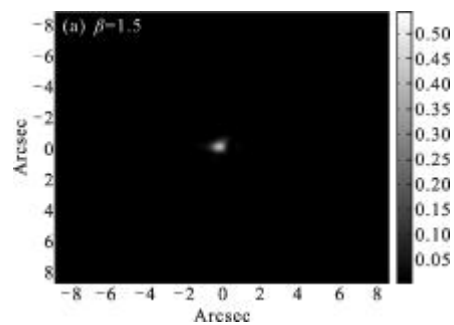
### 2.3 非理想高斯光束模拟

当关注高斯光束输出集中度时, 多采用桶中功率和  $\beta$  因子, 对于激光光束,  $\beta$  可以用焦斑半径来定义, 但由于焦斑半径难于测量, 也可以定义为<sup>[7-8]</sup>:

$$\beta = \sqrt{A_m/A_0} \quad (5)$$

$A_m$ 、 $A_0$  分别为桶中功率比为 63% 时, 实际光束和理想光束所对应的面积<sup>[9-10]</sup>。所以相对于平面波, 高斯光束的光束质量因子只是桶中功率比不同。根据相同的方法同样可以仿真实际激光器的出光光束因波前相位误差而导致的光束质量的下降。

将高斯束腰设为 0.02m, 仿真精度同样设置为 2%, 待模拟光束质量为 1.5~5.5, 步长为 1, 其他条件与平面波相同。利用修正方法, 得到仿真过程中的远场光斑如图 7 所示, 图 8 为仿真结果与理论设置值的对



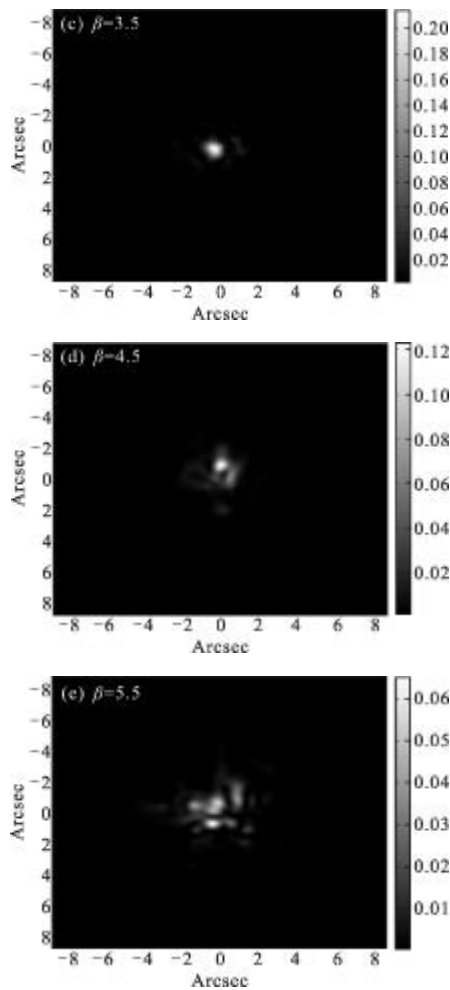


图 7  $\beta=1.5-5.5$  条件下仿真结果计算的远场光斑

Fig.7 Far field image of simulation result when  $\beta=1.5-5.5$

比统计结果,仿真次数为 30 次,每次迭代直至收敛。图中实线代表  $\beta$  设置值,圆点代表仿真结果的  $\beta$  计算值,可以看到,仿真结果能够在所设精度范围内满足仿真要求。

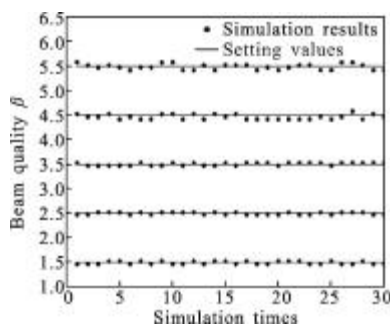


图 8 高斯光束  $\beta=1.5-5$  的仿真结果与理论对比统计结果

Fig.8 Statistic result for the Gauss light of the comparison between simulation and setting values with the condition that  $\beta=1.5-5$

针对光束质量非理想的高斯光束而言,上述等效相位屏的方法可以在一定程度上模拟实际激光器因高温、加工工艺等各种原因造成的像差,并且结果能够满足一定的精度要求。

等效相位屏的方法,其过程是在于通过对光源叠加像差而模拟光束质量的下降,在迭代过程中的逼近也不依赖于特定的评价指标。所以对于不同类型的光束,不论以哪种光束质量评价指标作为参考,以上方法同样适用。

### 3 结 论

基于衍射极限倍数  $\beta$  因子这种评价方法,根据波像差与光束质量的关系,介绍了基于等效 Kolmogorov 谱相位屏的实际光束仿真方法,能够模拟具有任意光束质量的光束,并且对方法进行了改进,使得精度能够达到一定要求。该方法能够仿真由于各种因素在光束的近场复振幅分布中引入误差所导致的光束质量的下降。首先,根据前人对波像差与  $\beta$  因子关系的总结,利用等效相位屏法对不同光束质量的平面波光束进行了仿真计算与验证,结果表明,在光束质量下降到一定程度时,拟合二次曲线已经存在严重偏差;其次,针对上述问题,用反复测量、迭代修正的方法对拟合关系进行了改进,并对改进结果进行了分析验证,使得结果能够满足仿真精度的要求。最后,针对高斯光束的衍射极限因子  $\beta$  进行了分析,表明上述方法对非理想高斯光束的模拟同样适用。

实际中的高斯光束质量下降的原因还有高阶模、多模的存在,其对光束的影响分布尚不清楚,如何对其导致的光束质量下降加以描述以及能否用波像差来等效,是今后需要进一步分析解决的问题。

### 参考文献:

[1] Xie Xiaogang, Tao Yingxue, Zhang Feizhou, et al. Research of component-based open-style modeling and simulation software [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(10): 2089-2097. (in Chinese)  
 谢晓钢,陶应学,张飞舟,等.基于组件的开放式建模仿真软件研究[J].系统仿真学报,2011,23(10):2089-2097.  
 [2] Gao Wei, Wang Yunping, Lin Bin, et al. Study on

- characterization and diagnosis of high power laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 61-64. (in Chinese)
- 高卫, 王云萍, 李斌, 等. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1): 61-64.
- [3] Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(5): 415-419. (in Chinese)
- 鲜浩, 姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系 [J]. *中国激光*, 1999, 26(5): 415-419.
- [4] Gao Wei. Definition of laser beam quality  $\beta$ -factor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1038-1040. (in Chinese)
- 高卫. 激光束衍射极限倍数  $\beta$  的确定方法 [J]. *光子学报*, 2003, 32(9): 1038-1040.
- [5] Siegman A E. Defining, measuring, and optimizing laser beam quality [C]//SPIE, 1993, 1868: 2-12.
- [6] Qian Jialie, Fan Dianyuan, Zhang Zhuhong, et al. On some basic issues related to light beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, 21(12): 981-987. (in Chinese)
- 钱列加, 范滇元, 张筑红, 等. 有关光束质量的若干基本问题及其新进展[J]. *中国激光*, 1994, 21(12): 981-987.
- [7] Lv Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 47-51. (in Chinese)
- 吕百达, 康小平. 对激光光束质量一些问题的认识 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 47-51.
- [8] Lv Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 14-17. (in Chinese)
- 吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(1): 14-17.
- [9] Siegman A E. How to (maybe) measure laser beam quality [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, 17(2): 184-199.
- [10] Siegman A E. New developments in laser resonators [C]//SPIE, 1990, 1224: 2-14.