

文章编号: 1001-3806(2009)01-0110-03

高斯光束大气传输规律的数值分析

周中亮

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为了分析光束传输与大气参量如大气能见度、折射率结构常数和激光自身参量如激光的波长、光束腰斑半径的关系,以高斯光束为例,推导了其远距离传输规律,采用数值模拟的方法分析了各因素对传输轴上和截面上光强分布的影响。结果表明,一旦激光发射系统的特征参量和大气传输效应的特征参量确定,就可判断激光大气传输的效果。这一结果为激光工程应用的可行性及系统参量的优化设计提供了依据。

关键词: 大气与海洋光学;激光传播;高斯光束;衰减效应;湍流效应

中图分类号: TN012; TN241 **文献标识码:** A

Numerical analysis of Gaussian beam propagating in atmosphere

ZHOU Zhong-liang

(Department of Optics & Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to analyze the relationship between the laser propagation and atmospheric parameters like visibility and refractive index structure constant and laser beam parameters like the wave length and waist width, the propagating law and the influence on the laser intensity was studied based on the Gaussian beam. The results indicates that if the parameters of the laser source and atmosphere are confirmed, the effect of laser propagation is easy to know, which could provide a rule for the feasibility of laser engineering application, as well as conduct laser system design optimization.

Key words: atmospheric and ocean optics; laser propagation; Gaussian beams; attenuation effects; turbulence effects

引言

激光作为新兴的高科技军事手段,在国防上有特殊的地位。现代光电对抗武器如高能战略级激光武器系统、战术级激光武器系统等研制开发大都需要考虑到激光束的远距离传输。激光束在大气中远距离传输时,必然要受到大气的影响,如大气吸收与散射造成激光能量的衰减,大气湍流效应所引起的激光光束的扩展、漂移以及光强起伏则严重地影响激光传输的质量^[1-3]。

在具体的激光工程应用中,人们关注的主要是大气传输效应究竟会给工程应用带来多大的影响,如对激光能量传输的衰减、横向分布等重要参量影响的定量关系。由于各种大气传输效应以及实际大气的复杂性,难以获得解析关系式,从而往往很难给出具体的、定量的回答^[3]。作者以高斯光束为例,推导出了其远距离传输公式,并以典型的激光传输条件,对光束轴向

功率变化和横向功率分布等传输过程中的重要参量作了分析。

1 高斯光束振幅分布的数学模型

在极坐标下,基模高斯光束的横向振幅分布^[4,5]:

$$U(r, z) = U_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \quad (1)$$

式中, $w(z)$ 表示 z 处高斯光束光斑半径; z 轴取激光的发射光轴方向,原点在光束的腰斑中心; w_0 为高斯光束的腰斑半径。 λ 表波长, r 表半径, U_0 表初始振幅,且有:

$$w(z) = w_0 [1 + (\lambda z / \pi w_0^2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

在 $z = z_0$ 平面的光束功率密度分布可以表示为:

$$P(r, z_0) = |U(r, z_0)|^2 = U(r, z_0) U^*(r, z_0) = U_0^2 \frac{w_0^2}{w^2(z)} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2(z)}\right] \quad (3)$$

设 P_0 为光束单位时间穿过 $z = z_0$ 平面的所有能量的总和,则有:

$$P_0 = \int_0^{+\infty} P(r, z_0) 2\pi r dr = \int_0^{+\infty} 2\pi r U_0^2 \frac{w_0^2}{w^2(z)} \times \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2(z)}\right] dr = \pi U_0^2 w_0^2 / 2 \quad (4)$$

作者简介:周中亮(1983-),男,硕士研究生,研究方向为光电对抗和图像处理。

E-mail: liang19830815@126.com

收稿日期:2007-10-24;收到修改稿日期:2008-01-11

所以,
$$U(r,z) = \sqrt{\frac{2P_0}{\pi}} \frac{1}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \quad (5)$$

(5)式是总功率为 P_0 的高斯光束振幅分布表达式。并可得到功率密度分布为:

$$P(r,z) = |U(r,z)|^2 = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} \exp\left[-2\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \quad (6)$$

2 大气传播效应

当激光在大气中传输时会产生大气衰减效应及湍流效应^[6]。大气衰减效应是大气的吸收和散射共同影响的表现,它直接导致传输激光光强的下降;大气湍流会改变光束的传输特性和降低光束的质量^[7]。

2.1 大气衰减效应

对于激光功率在大气介质中传输的衰减,通常用 Beer 定律^[8]来描述:

$$P_\lambda(L) = P_{\lambda 0} \exp[-\sigma(\lambda)L] \quad (7)$$

式中, $P_\lambda(L)$ 是波长为 λ 的激光在大气中传输 L 距离后的功率, $P_{\lambda 0}$ 是激光的发射功率, $\sigma(\lambda)$ 是大气衰减系数 (km^{-1})。大气衰减系数 $\sigma(\lambda)$ 是大气中各种分子微粒的吸收和散射系数的总和,即 $\sigma = k + \gamma$, 其中, k 是每千米的吸收系数, γ 是每千米的散射系数。

一般情况下,通常使用下面的依据能见度的经验公式来计算衰减系数:

$$\sigma(\lambda) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} \quad (8)$$

式中, V 为能见度,其单位为 km , q 是与波长 λ 有关的常数,对于红外波段的取值为:

$$q = \begin{cases} 1.6, & (V \text{ 很大}) \\ 1.3, & (\text{中等能见度}) \\ 0.585V^{1/3}, & (V \leq 6\text{km}) \end{cases} \quad (9)$$

2.2 大气湍流效应

根据广义惠更斯-菲涅耳原理^[9]可以推导出高斯光束通过湍流大气传输的光强分布为^[7]:

$$P(r,z) = \frac{B^2}{G^2} P(0,0) \exp\left[-\frac{2B^2}{G^2} \left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right] \quad (10)$$

式中, $B = \frac{k}{2z}$, $G = \sqrt{\frac{1}{w_0^4} + \frac{2}{w_0^2 \rho_0^2} + \frac{k^2}{4z^2}}$, 其中, $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$, C_n^2 是折射率结构常数,它表征湍流的强弱,典型值从 $1 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ (对于强湍流) 到 $1 \times 10^{-18} \text{m}^{-2/3}$ (对于弱湍流)^[10]。

又 $P(0,0) = \frac{2P_0}{\pi w_0^2}$, 并结合(6)式、(8)式、(10)式

可以得出高斯光束的功率传输表达式:

$$P(r,z) = \frac{2B^2 P_0}{\pi G^2 w_0^2} \exp\left[-\sigma(\lambda)z/1000\right] \times$$

$$\exp\left[-2\frac{B^2}{G^2} \left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right] \quad (11)$$

3 数值分析

由(11)式可以看出,高斯光束经大气传输受光束参量(激光波长,腰斑半径)和大气参量(大气能见度和折射率结构常数)影响。

3.1 大气参量对光束传输的影响

首先考虑大气环境对传输的影响,取 $P_0 = 10^6 \text{W}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 0.01 \text{m}$ 。由(11)式,分别令 $r = 0 \text{m}$, $z = 12 \text{km}$,可以得到轴上和传输距离为 12km 时的横向激光功率分布,如图1和图2所示,分别列出了能见度

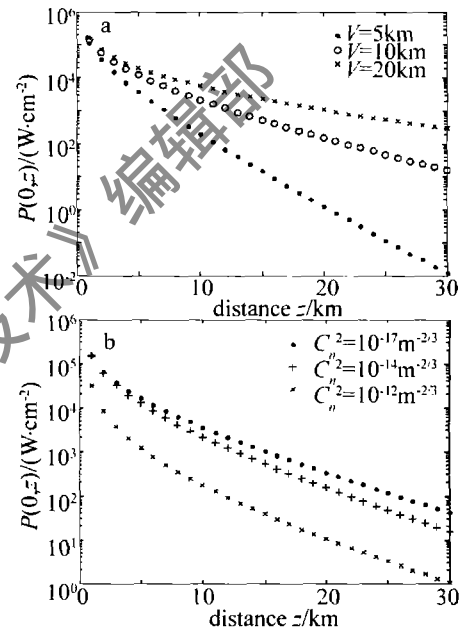


Fig. 1 Laser power density transmission on axis with different atmosphere parameters ($r = 0 \text{m}$)

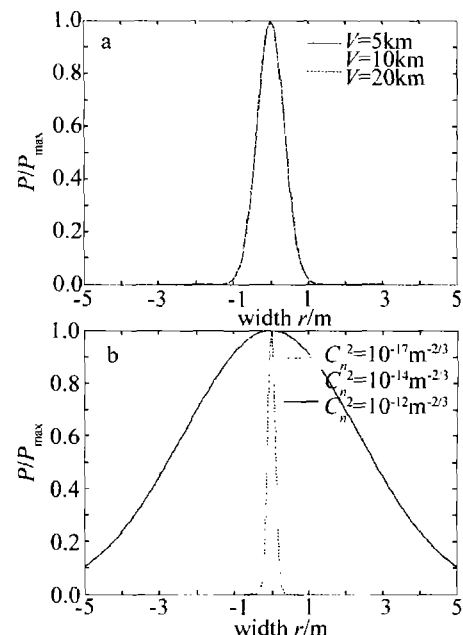


Fig. 2 Laser power distribution on receiver plane with different atmosphere parameters ($z = 12 \text{km}$)

$V = 5\text{km}, 10\text{km}, 20\text{km}$ (见图 1a 和图 2a) 和湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{m}^{-2/3}, 1 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}, 1 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ (见图 1b 和图 2b) 条件下激光功率传输曲线。可以看出, 随着能见度越低, 湍流越强, 轴上激光功率越小, 并且传播距离越远, 相互之间的差别也越大。但它们成因不尽相同, 能见度低使得激光轴向衰减, 而湍流不仅引起激光轴向衰减, 还会使光束横向扩展。

3.2 光束参量对光束传输的影响

取 $P_0 = 10^6 \text{W}, V = 10\text{km}, C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, 同样

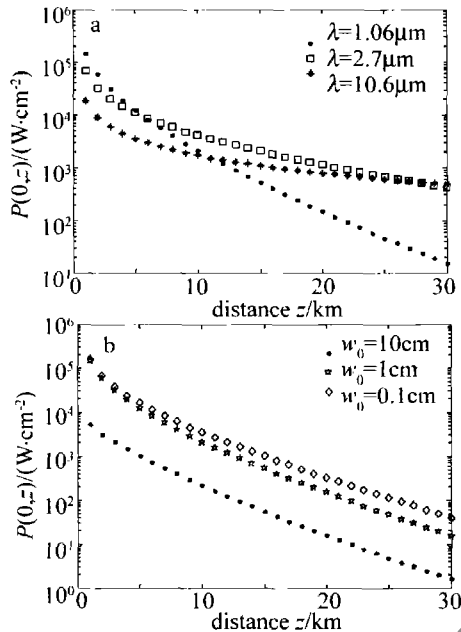


Fig. 3 Laser power density transmission on axis with different laser parameters ($r = 0\text{m}$)

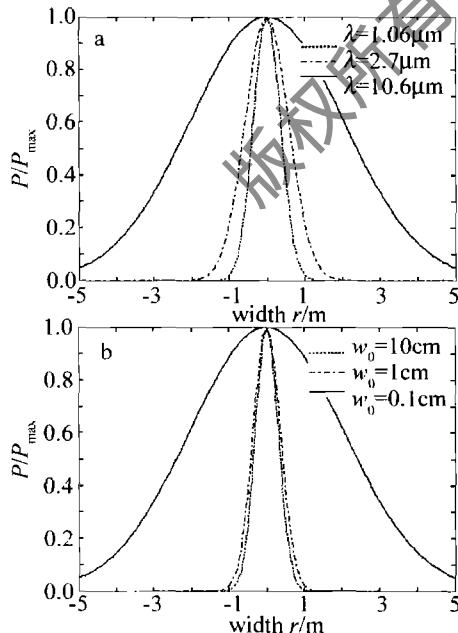


Fig. 4 Laser power distribution on receiver plane with different laser parameters ($z = 12\text{km}$)

可以得到轴上和传输距离为 12km 时的横向激光功率分布, 如图 3 和图 4 所示, 图中分别列出了激光波长为 $1.06\mu\text{m}, 2.7\mu\text{m}, 10.6\mu\text{m}$ (见图 3a 和图 4a) 和束腰宽度 w_0 为 $10\text{cm}, 1\text{cm}$ 和 0.1cm 条件下 (见图 3b 和图 4b) 激光功率传输曲线。光学参量的影响情况比较复杂: 波长越短, 轴上功率衰减越快, 但光束展宽越不明显。由高斯光束特性可知, 束腰越小, 光束发散角越大, 光束光束展宽越明显, 图中展示了这一特性。

4 结 论

高斯光束在大气中远距离传输受到大气参量和激光束自身参量的影响。在提出光束传输解析式的基础上, 选取了多种典型激光传输条件下的计算参量, 数值模拟了光束轴向和横向功率分布, 分析了各因素对传输轴上和截面上功率分布的影响。一旦了解激光发射系统的特征参量和大气传输效应的特征参量, 就可由上述定标关系迅速判断激光大气传输的效果, 从而为激光工程系统的参量优化设计及其应用效能评估提供依据。另外, 分析中的功率分布是时间平均效果, 对于湍流引起的随机光场分布还有待进一步讨论。

参 考 文 献

- [1] LIU J G, HUANG Y B, WANG Y J. Numerical analysis of intensity fluctuation scale characteristics in space laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1009-1012 (in Chinese).
- [2] YU Y, NIU Y X, WANG X Sh, *et al.* Numerical simulation of steady-state thermal blooming about high power laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 182-184 (in Chinese).
- [3] CHENG Y B, SUN X Q, ZHAO M H, *et al.* Analysis of the signal detection of laser scattering in the air [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 277-279 (in Chinese).
- [4] NIU Y X, ZHANG P, YAO J Q, *et al.* Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne photo electric detecting system [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 793-796 (in Chinese).
- [5] LIU J, TAN J B, ZHAO Ch G, *et al.* Impact on photolithographic spot intensity caused by collimated beam with Gaussian attribute [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(12): 1627-1630 (in Chinese).
- [6] YUAN Z H, ZHANG W T. Analysis of the laser beam through random atmosphere channel [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(5): 696-700 (in Chinese).
- [7] JI X L, TANG M Y. Propagation properties of one-dimensional off-axis Gaussian beams through the turbulent atmosphere [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4968-4973 (in Chinese).
- [8] WEBER H. Focusing and imaging of laser beams [J]. Opt Commun, 1987, 62(2): 124-127.
- [9] FANTE R L. Wave propagation in random media; a systems approach [M]. Amsterdam: Elsevier, 1985: 343-398.
- [10] ZHANG Y X, CHI Z Y. The propagation and imaging of the light wave in atmosphere [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 15-17 (in Chinese).