

文章编号:1001-5078(2008)10-0974-04

· 激光技术与应用 ·

## 大气湍流对激光传输的影响

武琳, 应家驹, 耿彪

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:**为了研究大气湍流对激光传输的影响,以大气湍流的激光传输效应为基础,建立了激光到达接收面的光强分布模型。模型考虑了折射率结构常数、传输距离、发射面和接收面孔径以及湍流引起的光束展宽等参数,分析这些参数对接收面光强分布的影响,以此研究大气湍流对激光传输的影响,并提出降低湍流影响采取的措施。

**关键词:**大气湍流;激光传输;光强分布

**中图分类号:**P401;P407.5 **文献标识码:**A

## Effect on Laser Propagation in the Atmospheric Turbulence

WU Lin, YING Jia-ju, GENG Biao

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

**Abstract:** In order to study the effect on laser propagation in the atmospheric turbulence, the model of intensity distribution on the receiver plane was derived based on laser propagation in the atmospheric turbulence. And the parameters like structural constant of atmosphere refraction coefficient, propagation distance, aperture of transmitter and receiver plane, and extended area caused by atmospheric turbulence were analyzed which impact on laser intensity distribution. This research focused on the effect on laser propagation in the atmospheric turbulence and proposes some methods to restrain the influence of turbulence.

**Key words:** atmospheric turbulence; laser propagation; intensity distribution

### 1 引言

大气湍流是自由空间光传输所面临的一个重要问题。对于随机信道光波传输而言,光束扩展、光斑抖动和相干性退化是限制激光充分发挥其效能的重要因素。光波通过大气传输和成像是激光通信、航空测绘、卫星遥感、光学雷达等领域湍流大气环境中进行光学系统设计和使用时必须考虑的问题。本文通过建立大气湍流影响下接收面光强分布模型,研究大气湍流对激光传输的影响,从而提出降低湍流影响所采取的措施。

### 2 大气湍流的激光传输效应<sup>[1-3]</sup>

大气总是处于不停地运动中,形成了温度、压

强、密度、大小等不同的气体旋涡。这些旋涡相互关联、叠加,形成了随机的湍流运动。激光在湍流大气传输时,传输光束波前将随机起伏,从而引起光束漂移、光束展宽和光强闪烁。

由于湍流尺寸在湍流内尺度 $l_0$ 和湍流外尺度 $L_0$ 连续分布,光束直径在传播过程中不断变化,上述湍流效应总是同时发生。大致规律如下:①当光束直径远远小于湍流内尺度时,湍流主要使光束产生随机偏折,接收面光束漂移;②当湍流尺度约等于光束直径时,湍流主要使光束截面发生随机偏转,从

**作者简介:**武琳(1983-),女,在读硕士研究生,研究方向为光电对抗与信息处理。E-mail:yinsudong@sohu.com

**收稿日期:**2008-04-09

而形成到达角起伏,接收面焦平面上出现像点抖动;  
③更常见的情况是当光束直径远大于湍流尺度时引起的光强闪烁。

### 3 激光在大气随机信道中的光强分布模型及传输特性

以简单的激光发射-接收系统为例,建立激光在大气随机信道中的光强分布模型,研究大气湍流对激光传输的影响。激光发射-接收系统示意图,如图1所示。

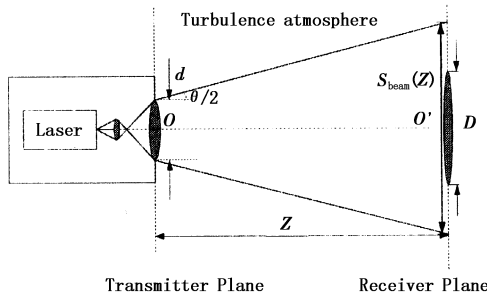


图1 激光发射-接收系统示意图

#### 3.1 激光光强分布模型

如图1所示,在发射面上,任意一点坐标用 $(x, y, 0)$ 来标记,记为 $\vec{r}(x, y, 0)$ , $r$ 为发射面上距离中心 $O$ 的横向距离,且 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。接收面上任意一点用 $\vec{r}(x', y', z)$ 表示,横向距离用 $r'$ 表示,且 $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ ,接收面与发射面的距离为 $Z$ ,在发射面上入射的高斯光束表示为<sup>[2]</sup>:

$$\tilde{E}(r, 0) = \exp\left[-\left(\frac{1}{w^2(0)} + \frac{ik}{2R(0)}\right)r^2\right] \quad (1)$$

其中, $\tilde{E}$ 为光场的复振幅; $R(0)$ , $w(0)$ 分别代表发射面( $Z=0$ )的光束波前的曲率半径和光斑半径的大小; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; $\lambda$ 为波长。如果假设在 $Z=0$ 处为光束束腰,且大小为 $w_0$ ,则式(1)可写为<sup>[4]</sup>:

$$\tilde{E}(r, 0) = \exp(-r^2/w_0^2) \quad (2)$$

(1)不考虑大气湍流影响,经过 $Z$ 距离的传输后,高斯光束表示为<sup>[5]</sup>:

$$\tilde{E}(r', Z) = \exp\left[-\frac{r'^2}{w^2(Z)} - ik\left(Z + \frac{r'^2}{2R(Z)}\right)\right] \quad (3)$$

$$w(Z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (4)$$

式中, $w(Z)$ 是与传播轴线相交于 $Z$ 点的高斯光束

等相位面上的光斑半径; $R(Z)$ 为传播轴 $Z$ 处的等相位面的曲率半径。

所以,经过 $Z$ 距离传输后,接收面光强分布为:

$$I(r', Z) = \tilde{E} \cdot \tilde{E}^* = I_0 \tau \left[ \exp\left(-\frac{r'^2}{w^2(Z)}\right) \right]^2 = I_0 \tau \left[ \exp\left(-\frac{2r'^2}{w^2(Z)}\right) \right] \quad (5)$$

其中, $I_0$ 为中心峰值光强; $\tau$ 为大气透过率。

又发射面光束总功率<sup>[2]</sup>:

$$P_0 = \frac{I_0 \pi w_0^2}{2} \quad (6)$$

所以:

$$I(r', Z) = \tilde{E} \cdot \tilde{E}^* = \frac{2P_0 \tau}{\pi w_0^2} \exp\left(-\frac{2r'^2}{w^2(Z)}\right) \quad (7)$$

(2)考虑大气湍流的影响,经过 $Z$ 距离的传输后,光强分布为<sup>[6]</sup>:

$$I(r', Z) = I_0 \tau \frac{B}{G} \exp\left[-\frac{2B^2}{G^2} \left(\frac{r'}{w_0}\right)^2\right] = \frac{2P_0 \tau}{\pi w^2(Z)} \frac{B}{G} \exp\left[-\frac{2B^2}{G^2} \left(\frac{r'}{w_0}\right)^2\right] \quad (8)$$

$$\text{式(8)中, } B = \frac{k}{2Z} \quad (9)$$

$$G = \sqrt{\frac{1}{w_0^4} + \frac{2}{w_0^2 \rho_0^2} + \frac{k^2}{4z^2}} \quad (10)$$

$$\text{式(10)中, } \rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5} \quad (11)$$

式(11)中, $C_n^2$ 为大气湍流折射率结构常数,典型的 $C_n^2$ 从 $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ (强湍流)到 $10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ (弱湍流)<sup>[7]</sup>。

#### 3.2 折射率结构常数对激光传输的影响

本文重点研究大气湍流对激光传输的影响,大气吸收与散射造成的能量衰减不予以考虑,所以令式(5)、式(7)、式(8)中 $\tau=1$ 。为比较激光在湍流影响下和不考虑湍流影响时的传输情况,将发射激光参数 $P_0=1 \times 10^6 \text{ W}$ , $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , $w_0=0.001 \text{ m}$ ,代入式(6)、式(7),求其在无大气湍流时 $Z=2 \text{ km}$ 处接收面光强分布图,如图2(a)所示。发射相同的激光若考虑弱湍流的影响,将 $C_n^2=10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 代入式(8)~式(11),得出接收面光强分布,如图2(b)所示。由图可知,大气湍流对激光能量衰减影响很大,在不考虑大气吸收与散射造成的光束能量衰减的情况下,弱湍流造成的轴向的能量衰减可达 $10^8$ 量级。

为进一步分析不同的湍流强弱对激光传输的影响,在上述条件不变的情况下,分别令折射率结构常数  $C_n^2 = 10^{-12} \text{m}^{-2/3}, 10^{-13} \text{m}^{-2/3}, 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ , 得出接收面横向激光光强分布如图3所示。 $C_n^2$  是随高度与水平方向以及时间变化的<sup>[1-2]</sup>, 但这里讨论时取作常数。可见,  $C_n^2$  直接影响接收面光强分布:  $C_n^2$  越大(大气条件越差), 轴向光强越小, 衰减越大, 光束展宽越严重。所以选择在大气条件较好的时候发射激光, 有助于在接收面探测时获得较高的能量。折射率结构常数的在一天内的变化大致是<sup>[8]</sup>: 从 10:00 ~ 15:00 较强, 其他时候较弱。

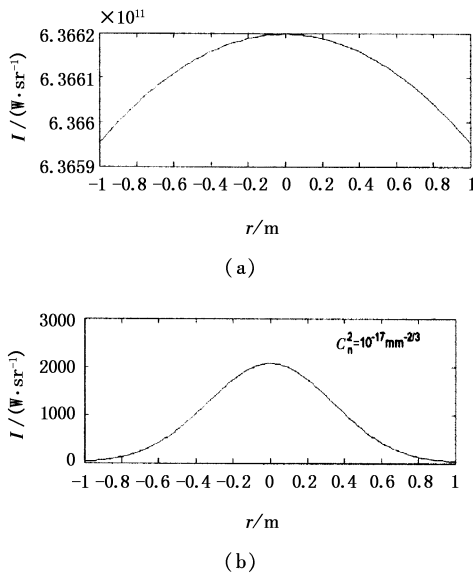


图2 激光在接收面的光强分布

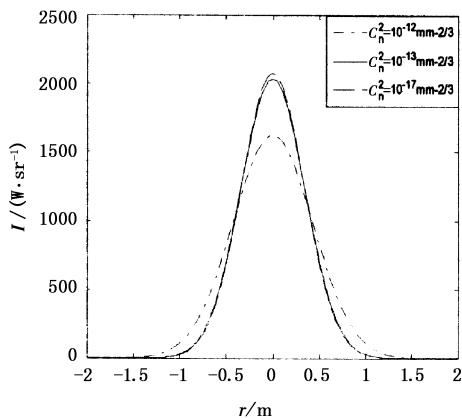


图3 不同  $C_n^2$  时接收面的光强分布

### 3.3 传输距离对轴上光强分布的影响

激光出射能量随传输距离的增加而递减。为反应传输距离对轴上光强分布的影响, 式(8)中令  $r' = 0$ , 将激光源参数  $P_0 = 1 \times 10^6 \text{W}, \omega_0 = 0.001 \text{m}$  代入式(7), 计算出传输距离从(0 ~ 4) km 时无湍流影

响下轴上光强分布。再令  $C_n^2 = 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ , 发射激光参数不变, 传输距离变化范围同样是从(0 ~ 4) km, 代入式(8) ~ 式(11), 计算湍流影响下轴上光强随传输距离的变化的值。二者相比, 得出无湍流和有湍流时轴上光强衰减倍数与传输距离变化的曲线, 如图4所示。可见, 传输距离越远, 衰减倍数越大, 而且变化越加剧烈, 说明湍流造成的能量衰减随距离的增加而加剧。所以, 短距离传输有利于减小湍流对激光的影响。

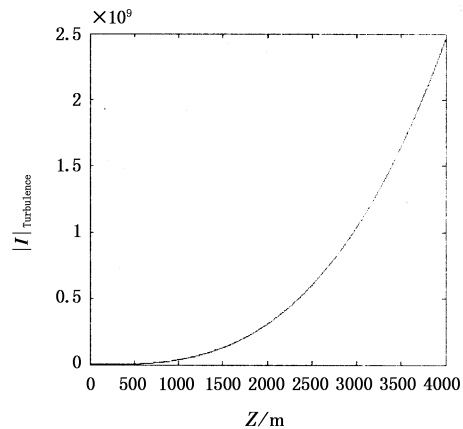


图4 衰减倍数与传输距离关系曲线

以上讨论了折射率结构常数、传输距离对激光在湍流大气中的传输造成的影响, 下面重点研究发射面和接收面孔径以及大气湍流引起的光束展宽对接收面光强分布的影响。

### 3.4 光束展宽和发射面孔径对激光能量的影响

考虑大气湍流引起的光束展宽, 激光传输  $Z$  距离时的光斑半径应做如下修正<sup>[9]</sup>:

$$w_t(Z) = [w^2(Z) + 4.38C_n^2 l_0^{-1/3} Z^3]^{1/2} \quad (12)$$

其中,  $l_0$  为湍流的内尺度; 一般为毫米量级。由式(12)可以看出, 展宽后的光斑半径由两部分组成, 不考虑大气湍流作用下传播  $Z$  距离时的  $w(Z)$  和由大气湍流造成的展宽部分  $w_t = 4.38C_n^2 l_0^{-1/3} Z^3$ 。

若考虑发射面孔径  $d$ , 则激光传输距离  $Z$  之后光斑面积为:

$$S_{\text{beam}}(Z) = \pi \left[ \frac{(d + \theta Z)^2}{4} + w_t^2(Z) \right] \quad (13)$$

其中,  $\theta$  为激光远场发散角;  $\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0}$ 。

图5反应了不同折射率结构常数下发射面孔径与接收面轴向光强分布关系。发射激光参数为  $P_0 = 1 \times 10^6 \text{W}, \lambda = 1.06 \mu\text{m}, \omega_0 = 0.001 \text{m}$ , 在  $l_0 = 2 \text{mm}$  的

大气条件下传输  $Z = 3\text{km}$ 。由图可知,发射面孔径越大,经过相同距离传输后接收面能探测到的激光能量越小;并且弱湍流条件下发射面孔径大小对接收器接收到的能量影响较大,相比之下强湍流造成的影响较平缓,所以为减少激光能量损失应选用孔径较小的激光器。并且有研究表明<sup>[5]</sup>,采用多光束发射也可减少激光能量的衰减。

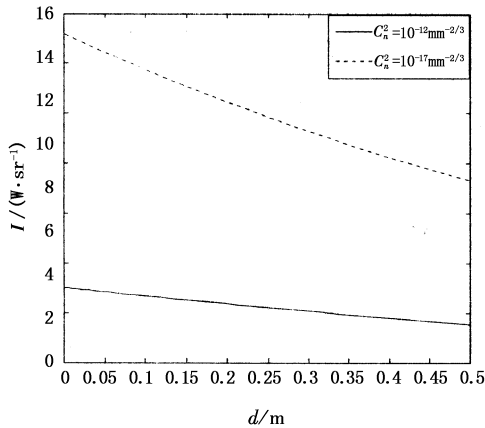


图5 轴上光强分布与发射面孔径关系图

### 3.5 接收器孔径对激光能量的影响

接收面光强分布不仅与发射面孔径有关,同样也受接收器孔径影响。设光强为  $I(r, Z)$  的随机信号入射到接收孔径为  $D$  的接收器上,接收器接收到的总光通量  $\phi_e$  为<sup>[10]</sup>:

$$\phi_e = \iint d^2r' P(D, r') I(r', Z) \quad (14)$$

式中,  $P(D, r')$  是孔径透过率权重函数,对于圆形孔径:

$$P(D, r') = \begin{cases} 1 & |r'| \leq D/2 \\ 0 & |r'| \geq D/2 \end{cases} \quad (15)$$

根据辐射度学知识可以算出进入接收器的平均光强分布为:

$$I_{in}(r', Z) = \frac{\phi_e Z^2}{S_{beam}(Z)} \quad (16)$$

图6给出了接收器轴上光强分布与其孔径的关系。取激光参数  $P_0 = 1 \times 10^6 \text{W}$ ,  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ,  $\omega_0 = 0.001 \text{m}$ , 大气条件:  $C_n^2 = 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ ,  $l_0 = 5 \text{mm}$ , 令发射面孔径  $d = 2 \text{mm}$ , 激光传输  $Z = 2 \text{km}$ ,  $D$  变化范围是从  $1 \sim 10 \text{mm}$ 。可见,接收器孔径与激光能量成正比,选择较大孔径的接收器能够平滑大气闪烁效应。

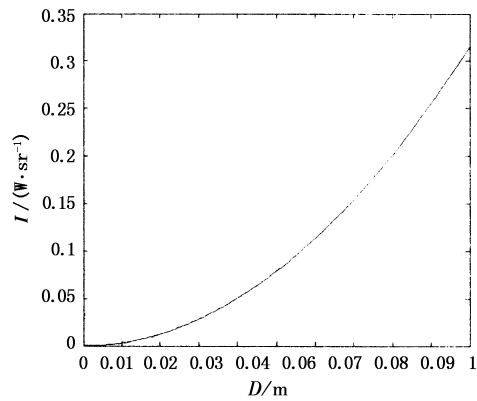


图6 轴上光强分布随接收器孔径的变化曲线

## 4 结论

本文研究了大气湍流的激光传输效应,建立了高斯光束经湍流大气传输后到达接收面的光强分布模型,研究了  $C_n^2$ 、传输距离、发射面和接收面孔径以及光束展宽对激光传输的影响,研究表明:大气湍流对激光的传输影响非常显著,要想提高接收器所探测到激光的能量,一是可以选择在折射率结构常数较小(大气条件较好)的情况下发射激光;二是采用小孔径发射,大孔径接收;三是减小激光的传输距离,另外还可以通过压缩激光的发散角,采用多光束发射等。

## 参考文献:

- [1] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999:246-251.
- [2] 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社,2006:114-154.
- [3] 邢建斌,许国良,等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报,2005,34(12):1850-1852.
- [4] 田芃,元秀华,等. 大气湍流中受限高斯光束的轴向光强分布[J]. 量子电子学报,2007,24(3):352-355.
- [5] 周炳琨,高以智,等. 激光原理[M]. 第4版,北京:国防工业出版社,2000:69-73.
- [6] 季小玲,汤明玥. 一维线阵离轴高斯光束通过湍流大气的传输特性[J]. 物理学报,2006,55(9):4968-4972.
- [7] 张逸新,迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京:国防工业出版社,1997:15-17.
- [8] 袁纵横,张文涛. 大气湍流对激光信号传输影响的分析研究[J]. 激光与红外,2006,36(4):272-274.
- [9] K S Shaik. Atmospheric propagation effects relevant to optical communication[R]. TDA Progress Report,1988.
- [10] 张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]. 北京:国防工业出版社,2002:200-240.