

# 舰载激光通信中大气对激光远场光强分布的影响

赵英俊, 王江安, 任席闯

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**在舰载激光通信系统中,激光远场光强分布对系统通信质量的提高具有重要影响。利用所建立的激光远场光强分布模型和  $1.06 \mu\text{m}$  激光大气传输特性,研究了大气能见度对激光远场光强分布的影响。结果表明:在不考虑大气湍流影响的条件下,能见度越高,光强衰减越小;在只考虑大气湍流影响的条件下,传输激光的波长,大气折射率结构常数,对激光远场光强分布具有重要影响。

**关键词:**光强分布;能见度;大气吸收与散射;湍流

**中图分类号:**TN929.12      **文献标识码:**A

## Atmosphere on beam intensity distribution of far-field laser in ship-borne laser communication

ZHAO Ying-jun, WANG Jiang-an, REN Xi-chuang

(Academy of Electronic Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In the system of ship-borne laser communication, the laser has an important influence on improving communication quality. Using the model of laser beam intensity distribution and the  $1.06 \mu\text{m}$  laser transmission characteristics in the atmosphere, has studied the influence degree of the atmospheric visibility on the beam intensity distribution in far-field. The result indicated: Without considering the influence of atmospheric turbulence, the visibility is higher, the beam intensity attenuation is smaller; Under the condition that only considered the atmospheric turbulence influence, wave length of transmission laser and refractive index of atmospheric structure constant have an important influence on beam intensity distribution.

**Key words:** intensity distribution; visibility; atmospheric absorption and scattering; turbulence

### 1 引言

舰载激光通信具有容量大、数据率高、体积小、抗电磁干扰能力强、安全保密性好、通信带宽极宽,可以实现远距离通信。而舰载激光通信易受天气条件的影响<sup>[1]</sup>,低空海面上空经常出现的大雾、雨滴以及大气湍流效应都会导致激光远场光强分布发生变化,影响通信质量的提高,严重时会导致通信中断。所以有必要对激光远场光强分布进行研究。

本文以简单的激光发射-接收系统为例,建立了激光在大气随机信道中传输后的远场光强分布模型。模拟了在不同条件下,各种因素对激光远场光

强分布的影响。

### 2 大气对激光传输的影响

#### 2.1 大气衰减<sup>[2-3]</sup>

在海洋大气上空含有大量的水滴、雾和水蒸气,导致激光在传输时能量衰减很快。云雾引起的衰减一般较大<sup>[2]</sup>,大气对激光的散射和吸收效应引起激光的衰减。激光在大气介质中传输时的衰减规律遵循 Beer 定律,大气透过率的计算公式为<sup>[3]</sup>:

**作者简介:**赵英俊(1984-),男,硕士研究生,主要从事舰船大气激光通信方向研究。E-mail:zyj\_008@163.com

**收稿日期:**2009-01-13

$$\tau(Z) = \frac{I(Z)}{I_0} = \exp\left[-\int_0^Z \delta(r) dr\right] \quad (1)$$

对于晴空大气,大气消光系数  $\delta(Z)$  为大气分子消光系数  $\delta_m(Z)$  与大气气溶胶消光系数  $\delta_a(Z)$  之和:

$$\delta(Z) = \delta_m(Z) + \delta_a(Z) \quad (2)$$

而大气分子和气溶胶的消光系数,又可以表示为:

$$\begin{aligned} \delta_m(Z) &= \delta_{am}(Z) + \delta_{sm}(Z) \\ \delta_a(Z) &= \delta_{aa}(Z) + \delta_{sa}(Z) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\delta_{am}(Z)$  和  $\delta_{sm}(Z)$  分别为大气分子的吸收系数和散射系数;  $\delta_{aa}(Z)$  和  $\delta_{sa}(Z)$  分别为大气气溶胶的吸收系数和散射系数。所以激光传输受到四种衰减因素的影响,它包含了纯粹的大气分子吸收、散射和大气气溶胶的吸收和散射。大气透射率  $\tau(Z)$  可表示为<sup>[4]</sup>:

$$\tau(Z) = \tau_a(Z) \cdot \tau_m(Z) \cdot \tau_r(Z) \cdot \tau_s(Z) \quad (4)$$

式中,  $\tau_a(Z)$  为气溶胶的大气透射率;  $\tau_m(Z)$  为分子大气透射率;  $\tau_r(Z)$  为雨滴的大气透射率;  $\tau_s(Z)$  为雪花的大气透射率。总的透射率可表示为:

$$\tau(Z) = \tau_{sc}(Z) \cdot \tau_{ab}(Z) \quad (5)$$

式中,  $\tau_{sc}(Z)$  为散射透射率;  $\tau_{ab}(Z)$  为吸收透射率。

大气中水汽、二氧化碳和臭氧等气体分子具有丰富的光谱吸收带,是构成大气分子吸收衰减的主要因素;对于  $1.06 \mu\text{m}$  激光,纯粹大气分子吸收系数均小于  $10^{-6} \text{ km}^{-1}$ ,与其他衰减因素相比完全可以忽略不计,所以仅考虑水蒸气的吸收<sup>[5]</sup>,即:

$$\tau_{ab}(Z) = 1 - \text{erf}(0.0617 \sqrt{\alpha}) \quad (6)$$

其中,  $Z$  为传输距离;  $\alpha$  为水蒸气质量分数,表达式为:  $\alpha = F_k \cdot Z$ ,其中,  $F_k$  可通过查表获得。

而引起散射的因素包括纯粹大气分子的散射和大气气溶胶的散射,纯粹的大气对  $1.06 \mu\text{m}$  激光传输的影响非常微弱,可以不加考虑<sup>[6]</sup>。散射颗粒包括工业排放的烟尘粉尘,烟、雾、灰尘、沙砾以及雨雪等。通常将散射因素分为 3 类<sup>[7]</sup>:第 1 类包括烟雾和云;第 2 类包括大气中的气溶胶;第 3 类包括雨雪。

(1) 在考虑烟雾和云的影响,散射透过率为:

$$\tau_{sc}(Z) = \exp[-\gamma(\lambda)Z] \quad (7)$$

对于波长为  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  的激光有如下经验公式:

$$\gamma(\lambda) = \frac{3.912}{R} \times \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{-q} \quad (8)$$

式中,  $R$  为大气能见度,单位为  $\text{km}$ ;  $q$  是常数,有:

$$q = \begin{cases} 1.3 & (R \geq 11 \text{ km}) \\ 0.585R^{1/3} & (R < 11 \text{ km}) \end{cases} \quad (9)$$

(2) 仅考虑气溶胶的影响,散射透过率为:

$$\tau_{sc}(Z) = \exp\left(-\frac{3.912Z}{R}\right) \quad (10)$$

(3) 仅考虑雨、雪的条件下,散射透过率为:

$$\tau_{sc}(Z) = \exp(-\delta Z) \quad (11)$$

由以上推导,根据公式(5)可计算出各种条件下总的透射率。

## 2.2 大气湍流<sup>[8-9]</sup>

在海洋上空,大气最重要的特征是通常处在湍流运动状态。由于太阳照射等因素所产生的大气微小温度随机变化将导致大气风速随机变化,从而形成大气的湍流运动。根据 Kolmogorov 的理论,统计结构函数<sup>[8]</sup>:

$$D_{rr} = c_v^2 \times r^{2/3} \quad (l_0 \leq r \leq L_0) \quad (12)$$

式中,  $c_v^2$  是速度结构常数;  $r$  表示湍流空间中两点的间距;  $l_0, L_0$  分别为湍流的内外尺度。将 Kolmogorov 理论应用于折射理论,得到折射率起伏湍流模型,即 2/3 定律:

$$D_n(r) = c_n^2 \times r^{2/3} \quad (l_0 \leq r \leq L_0) \quad (13)$$

式中,  $c_n^2$  为折射率结构函数,  $c_n^2$  的值与局部的天气条件和离地面高度有关, Kolmogorov 理论以离开地面  $5 \text{ km}$  为基点得出相应的模型。

当离开地面的高度  $h < 5 \text{ km}$  时,则 Hufnagel 给出的经验公式为<sup>[9]</sup>:

$$c_n^2 = 1.5 \times 10^{-13} \div h \quad (\text{m}^{2/3}) \quad (14)$$

从经验公式中可以看出,在  $h < 5 \text{ km}$  时,影响  $c_n^2$  的主要因素是高度,  $c_n^2$  随高度的变化而变化,而风速、温度的影响可以不考虑。  $c_n^2$  是描述折射率湍流强度的系数。在海平面上空  $1 \sim 50 \text{ m}$  处,由式(14)可以得到的得到如图 1 所示的曲线。纵坐标代表湍流强度,单位为  $\text{m}^{2/3}$ ;横坐标代表高度,单位为  $\text{km}$ 。由图 1 可知,随着高度的增加,湍流强度逐渐减弱。

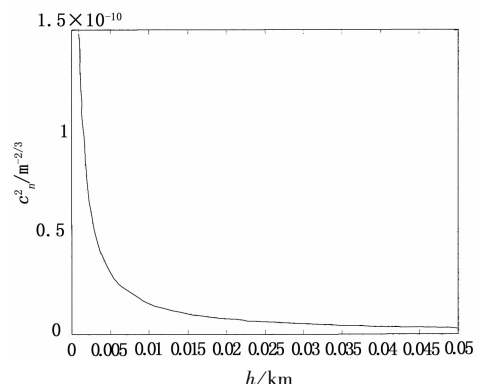


图 1  $c_n^2$  和  $h$  的关系曲线

### 3 激光远场光强分布模型

以简单的激光发射-接收系统为例,建立舰载激光通信中激光远场光强分布模型。激光发射-接收系统示意图如图2所示。

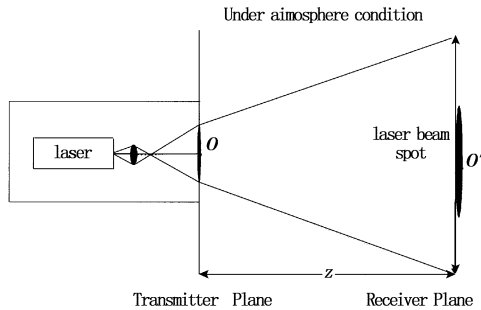


图2 激光发射-接收系统示意

在发射面上,任意一点坐标用 $(x, y, O)$ 来标记, $r$ 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 $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ ,接收面与发射面距离为 $Z$ 。在发射面上入射的高斯光束表示为:

$$\tilde{E}(r, 0) = \exp(-r^2/w_0^2) \quad (15)$$

#### 3.1 不考虑大气湍流的影响,激光远场光强分布模型

不考虑大气湍流的影响,经 $Z$ 距离传输后,高斯光束可表示为:

$$\tilde{E}(r', z) = \exp\left[-\frac{r'^2}{w^2(Z)} - ik\left(Z + \frac{r'^2}{2R(Z)}\right)\right] \quad (16)$$

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2} \quad (17)$$

其中, $W(z)$ 为高斯光束等相位面上的光斑半径; $R(Z)$ 为曲率半径; $w_0$ 为光束束腰。所以激光传输 $Z$ 距离后,远场光强分布<sup>[10]</sup>为:

$$I(r, z) = \tilde{E} \cdot \tilde{E}^* = \frac{2P_0\tau}{\pi w_0^2} \left[ \exp\left(-\frac{2r^2}{W(Z)}\right) \right]^2 \quad (18)$$

式中, $P_0$ 为发射面总功率, $P_0 = \frac{I_0 \pi w_0^2}{2}$ ;  $I_0$ 为中心峰值光强; $\tau$ 为大气透过率。

(1)在仅考虑烟雾和云的影响条件下,总的透射率为:

$$\tau = [1 - \text{erf}(0.0617\sqrt{a})] \times \exp\left[-\frac{3.912}{R_v} (1.93)^{-q} Z\right] \quad (19)$$

将 $\tau$ 带入公式得激光远场光强分布表达式为:

$$I(r, z) = \frac{2P_0}{\pi w_0} \times [1 - \text{erf}(0.0617\sqrt{a})] \times \exp\left[-\frac{3.912}{R} (1.93)^{-q} Z\right] \times \exp\left(-\frac{2r^2}{W(Z)}\right) \quad (20)$$

式中, $R$ 为大气能见度。

仅考虑烟雾和云的影响,令发射激光参数 $P_0 = 1 \times 10^6$  W,  $\lambda = 1.06$   $\mu\text{m}$ ,  $\omega_0 = 0.001$  m,  $a = 0.6$ ,传输距离 $Z = 2$  km时。分析在仅考虑烟雾、云的条件下,大气能见度激光远场光强分布的影响。

根据2006年4月28日在孝感空军气象台进行的试验数据,选取霾、轻雾、大雾三种天气现象下的能见度值分别为, $R = 4.3$  km,  $2.5$  km,  $0.847$  km。由式(20)可以得到如图3所示激光远场分布曲线。

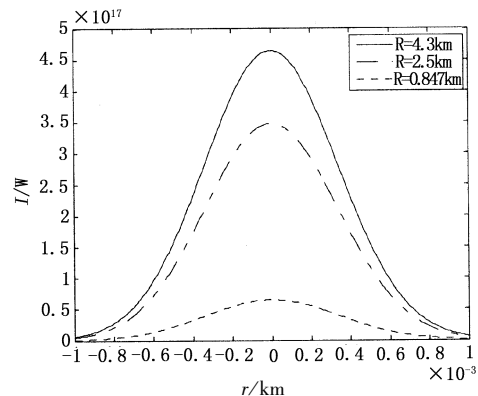


图3 不同能见度下光强分布曲线

图3为不同大气能见度下的激光远场分布曲线,纵坐标代表光强,单位为W;横坐标代表光斑半径,单位为km。由图3可知,能见度越大,光强衰减越小;从轴心到边缘光强逐渐衰减。所以要选择在能见度较好的天气条件下进行通信,才能确保通信质量,降低误码率。

(2)仅考虑气溶胶的影响,散射透过率为:

$$\tau = [1 - \text{erf}(0.0617\sqrt{a})] \times \exp\left[-\frac{3.912}{R_v} Z\right] \quad (21)$$

由上述的推导过程,同理可推导出在仅考虑气溶胶影响的条件下,光强分布的表达式为:

$$I(r, z) = \frac{2P_0}{\pi w_0} \times [1 - \text{erf}(0.0617\sqrt{a})] \times \exp\left[-\frac{3.912}{R} Z\right] \times \exp\left(-\frac{2r^2}{W(Z)}\right) \quad (22)$$

参数值同上,在仅考虑气溶胶影响条件下,选取晴朗天气条件下,能见度值分别为9 km, 13.7 km时,由式(22)可以得到如图4所示激光远场光强分布曲线。

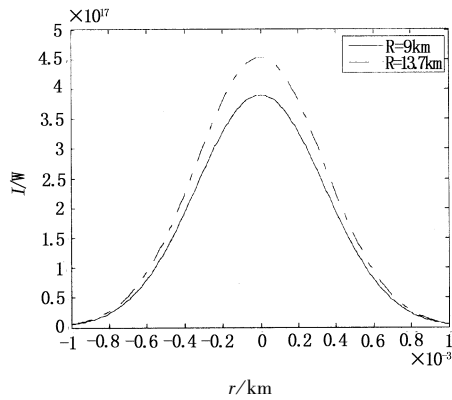


图4 仅考虑气溶胶影响下光强分布曲线

(3) 仅考虑雨、雪的条件下, 散射透过率为:

$$\tau = [1 - \text{erf}(0.0617 \sqrt{a})] \times \exp[-\delta Z] \quad (23)$$

激光远场光强分布表达式为:

$$I(r, z) = \frac{2P_0}{\pi w_0} \times [1 - \text{erf}(0.0617 \sqrt{a})] \times \exp[-\delta Z] \times \exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)}\right) \quad (24)$$

参数值同上, 由式(24)可知, 在仅考虑雨、雪的条件下, 激光远场光强分布与大气能见度无关, 而与参数  $\delta$  有关,  $\delta$  与降雨或降雪量的关系可查表<sup>[7]</sup>。取  $\delta = 0.07, 0.17, 0.24$  分别代表小、中、大雨、雪天气条件下, 由式(24)得到如图5所示激光远场光强分布曲线。由图5可知, 光强分布取决于降雨或降雪量,  $\delta$  值越大, 光强衰减越大。

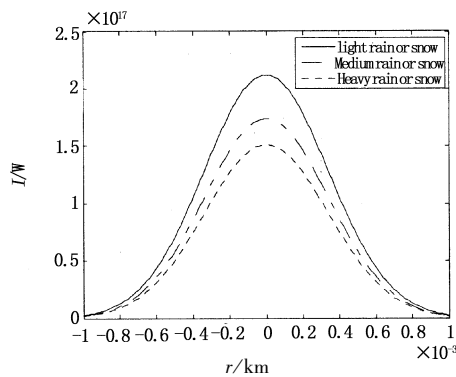


图5 不同  $\delta$  激光远场光强分布曲线

### 3.2 只考虑大气湍流的影响, 激光远场光强分布模型

只考虑大气湍流的影响, 经过  $Z$  距离传输后, 激光远场光强分布为:

$$I(r, Z) = I_0 \tau \frac{B}{G} \exp\left[-\frac{2B^2}{G^2} \left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right] \quad (25)$$

式中,  $B = \frac{k}{2Z}$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数;  $G = \sqrt{\frac{1}{w_0^4} + \frac{2}{w_0^2 \rho_0^2} + \frac{k^2}{4z^2}}$ , 其中  $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ 。取  $\tau = 1$ , 即不考虑大气吸收和散射造成的能量衰减的前提下, 只考虑大气

湍流对光强分布的影响。令发射激光参数  $P_0 = 1 \times 10^6 \text{ W}$ ,  $\omega_0 = 0.001 \text{ m}$ , 大气折射率结构常数  $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ , 传输距离时  $Z = 2 \text{ km}$ , 选取激光通信中常用的波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  作比较, 分析传输激光波长对轴向光强分布的影响。由式(25)得到如图6所示的轴向光强分布曲线, 纵坐标代表轴向光强, 单位为  $\text{W}$ ; 横坐标代表传输距离。由图6可知, 随着传输距离的增加, 轴向光强逐渐减弱; 在只考虑大气湍流对激光远场光强分布影响的条件下, 传输激光波长越短, 轴向光强衰减越小。

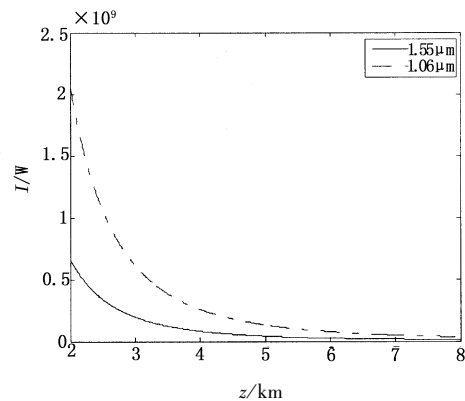


图6 不同波长的轴向光强分布

上述参数条件不变, 选取海平面上空  $1 \sim 50 \text{ m}$  处, 湍流强度变化范围  $(1.5 \times 10^{-13} \sim 3 \times 10^{-15}) \text{ m}^{-2/3}$ , 分析湍流强度对轴向光强分布的影响。由式(25)得到如图7所示的轴向光强分布曲线。纵坐标代表轴向光强, 单位为  $\text{W}$ ; 横坐标代表湍流强度, 单位为  $\text{m}^{-2/3}$ 。由图7可知, 随着湍流强度的增加, 轴向光强逐渐减弱。

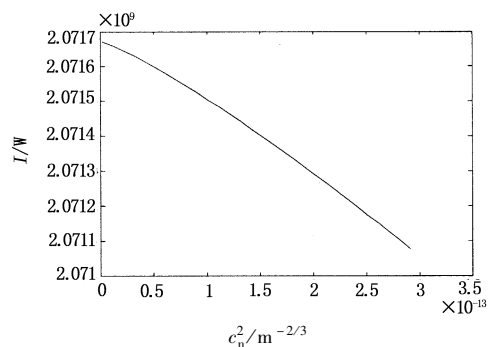


图7 湍流强度和轴向光强的关系曲线

## 4 结论

激光在大气中传输受到多种因素的影响, 导致了激光远场光强分布发生变化, 根据激光远场分布模型, 详细分析并推导了在不同情况下的光强分布特性, 并给出了结论。为在舰载激光通信中, 提高系统通信质量提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 吴思汉. 舰船无线激光通信[J]. 激光与红外, 2003, 33(2): 91 - 93.
- [2] 杨瑞科, 马春林, 韩香鹅, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增刊): 415 - 418.
- [3] 孙景群, 等. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1 - 40.
- [4] 张玉发, 李双刚, 孙晓泉. 激光大气传输透射原理及应用[J]. 光电技术应用, 2007, 22(3): 8 - 10.
- [5] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 7 - 23.
- [6] 杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15 - 19.
- [7] 丛明煜, 邵成勋, 王学孝, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  激光半主动制导目标与大气环境模型[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 71 - 77.
- [8] 吴健, 乐时晓. 随机介质中的光传播理论[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988: 128 - 148.
- [9] 李鑫, 张兴周, 吕科. 舰船激光通信中大气湍流对信道的影响[J]. 应用科技, 2008, 35(4): 14 - 17.
- [10] 武林, 应家驹, 等. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 974 - 977.