

· 光电工程系统技术 ·

海上厄米 - 高斯光束激光大气传输特性

赵英俊, 王江安, 梁善勇, 王乐东

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了研究大气传输效应对海上激光远场光强分布的影响, 以厄米 - 高斯(H-G)光束的传输为例, 建立了激光到达接收面的光强分布模型. 根据广义惠更斯 - 菲涅耳原理, 对 TEM_{00} 模和 TEM_{10} 模光束在不同大气折射率结构常数、传输距离和传输激光波长条件下的光强分布特性进行数值模拟. 结果表明, 在确定了大气传输效应的参量和光束参量之后, 就可以判断出激光远场光强分布特性.

关键词: 光通信; 光强分布; 厄米高斯(H-G)光束; 大气吸收与散射; 湍流

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)04-0021-04

Atmosphere Transmission Characteristic of Hermite-Gaussian Beam Laser at Sea

ZHAO Ying-jun, WANG Jiang-an, LIANG Shan-yong, WANG Le-dong

(University of Naval Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the effects atmosphere transmission on the laser beam intensity distribution at sea, a model of laser beam intensity distribution on reaching face is established based on the example of Hermite-Gaussian (H-G)s. According to the generalized Huygens-Fresnel principle, the peculiarity of laser beam intensity distribution is simulated under the different condition such as refractive index of atmospheric structure constant and transmission pace and laser wavelength. The result indicated: if the parameters of effect and beam is confirmed, the peculiarity of laser beam intensity distribution in far field can be determined.

Key words: optical communication; intensity distribution; Hermite-Gaussian beam; atmospheric absorption and scattering; turbulence

近年来对基模高斯光束在大气中的传输特性已进行了许多研究, 文献[2,3]对高阶模和厄米 - 双曲余弦高斯光束的大气传输问题进行了研究. 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, 重点研究了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传输激光的波长、光束腰斑半径对厄米 - 高斯光束(H-G)光强分布的影响, 并做了详细的数值计算和分析.

1 大气对激光传输的影响

激光在大气介质中传输时, 由于大气分子和气溶胶粒子的散射和吸收效应而衰减, 还因大气湍流作用而引起光束的闪烁、抖动等效应. 此外, 大气分子、原子和气溶胶粒子在激光照射下, 将产生多种散射过程.

1.1 大气衰减效应^[4,5]

在海洋大气上空含有大量的水滴、雾和水蒸气,

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 海军“十一五”预研项目.

作者简介: 赵英俊(1984-), 男, 黑龙江海伦人, 硕士, 主要从事舰船大气激光通信方面研究.

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,大气对激光的散射和吸收效应引起激光的衰减.对于激光在大气介质中的衰减通常可用 Beer 定律表示为

$$I(R) = I_0 \exp\left[-\int_0^R \sigma(r) dr\right] \quad (1)$$

式中, $I(R)$ 是波长为 λ 的激光在大气中传输 R 距离后的光强, I_0 是激光发射处的光束强度, $\sigma(r)$ 是距离 r 处的大气衰减系数 (km^{-1}), 式(1)表明, 激光的衰减取决于大气衰减系数, 在低层大气, 大气衰减系数 $\sigma(\lambda, V_h)$ 与激光波长和水平能见度 V_h 之间由经验关系式

$$\sigma(\lambda, V_h) = \frac{3.91}{V_h} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{0.585} V_h^{1/3} \quad (2)$$

由式(2)可知, 近地层的大气衰减系数与波长有关, 激光波长越短, 大气衰减系数越大.

1.2 大气湍流效应

海洋上空大气最重要的特征是通常处在湍流运动状态^[6], 人类活动和太阳辐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. 大气温度的随机变化产生大气密度的随机变化, 从而导致大气折射率的随机变化. 这些变化的累积效应导致大气折射率廓形的明显不均匀性, 从而在湍流大气中传输光束的波前也将作随机起伏, 由此引起光束抖动、光强闪烁、光束扩展和像点抖动等一系列光传输的大气湍流效应. 海洋上空大气湍流特性^[7]: 当气温与海温相差越大时, 温度起伏对湍流影响最大; 相反, 海面湿度越小, 湍流强度越强. 在较低湿度条件下, 尤其在红外窗口区, 湿度扰动对湍流影响特别大. 当气温小于海温时, 湍流强度随着海面风速的增大而增大, 后随风速的增大而减弱; 相反, 湍流强度总体上随着海面风速的增大而减弱. 以简单的激光发射-接收系统为例, 建立舰船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 1 所示.

如图 1 所示: 在发射面上, 任意一点坐标用 $\vec{r}(x, y, 0)$ 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 $\vec{r}'(x', y', L)$ 表示, 横向距离用 r' 表示, 且 $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$,

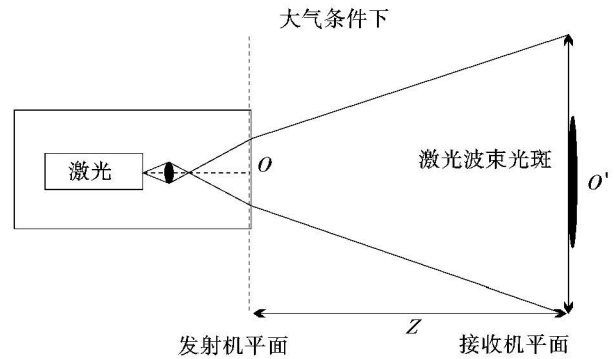


图 1 激光发射-接收系统示意图

接收面与发射面的距离为 L . 在厄米特-高斯函数近似下讨论 TEM_{10} 模的场分布特性, 则 TEM_{10} 模厄米-高斯光束在发射面上的场分布函数为

$$U_0(x, y, 0) = \frac{2x}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2w_0}\right) \quad (3)$$

其中, w_0 为基模高斯光束的束腰宽度. 根据广义惠更斯-菲涅耳原理可得 TEM_{10} 模厄米-高斯光束经湍流介质传输后的光强分布为^[8]

$$I(r', Z) = \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty U_0(r_1, 0) U_0^*(r_2, 0) \times \exp\left(\frac{ik|r_1 - r'|^2}{2L}\right) \exp\left(-\frac{ik|r_2 - r'|^2}{2L}\right) \exp\left[-\frac{D_{sp}(Q)}{2}\right] dr_1 dr_2 \quad (4)$$

式中, $Q = r_1 - r_2$, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为传输激光的波长, D_{sp} 为球面波结构函数, 且

$$D_{sp}(Q) = 1.093 C_n^2 k^2 L Q^{5/3} = 1.093 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \left(\frac{kQ^2}{L}\right)^{5/6} \quad (5)$$

式中, C_n^2 为折射率结构常数, 对式(5)进行近似处理, 即

$$\left(kQ^2/L\right)^{5/6} \approx kQ^2/L \quad (6)$$

所以此时, $D_{sp}(Q) = 0.89\sigma_1^2 \frac{kQ^2}{L}$, Rytov 变量 $\sigma_1^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$. 因为光强和激光功率成正比, 所以根据式(1)、式(3)~式(5)可得到 TEM_{10} 模 H-G 光束通过大气传输后的光强分布表达式为^[9]

$$I(x', y', L) = \left[\frac{8x'^2 w_0^2}{F^4 (1 + 1.78\delta_1^2 \Lambda)^3} + \frac{3.56\delta_1^2 \Lambda (1 + \Lambda\delta_1^2)}{(1 + 1.78\delta_1^2 \Lambda)^3} \right] \exp\left[-\frac{2(x'^2 + y'^2)}{F^2 (1 + 1.78\delta_1^2 \Lambda)}\right] \times \exp[-\sigma(\lambda)L] \quad (7)$$

式中, $\Lambda = 2L/kF$, $F = \omega_0(1 + \Lambda_0^2)^{1/2}$, $\Lambda_0 = 2L/k\omega_0^2$, $\sigma(\lambda)$ 为大气消光系数, 同时可证明 TEM₀₀ 基模高斯光束通过大气传输后的光强分布表达式为

$$I(x', y', L) = \frac{\omega_0^2}{\omega_e^2} \exp\left(-\frac{2(x'^2 + y'^2)}{\omega_e^2}\right) \times \exp[-\sigma(\lambda)L] \quad (8)$$

式中, $\omega_e = F(1 + 4q\Lambda/3)^{1/2}$, $q = 1.22\sigma_1^{12/5}$.

2 数值计算及结果分析

根据式(7)、式(8)给出的数学模型, 首先考虑大气环境对厄米-高斯光束的影响, 传输激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 光腰半径 $\omega_0 = 0.05 \text{ m}$, 令 $x = 0, y = 0$ 传输距离 $L = 5 \text{ km}$, 可得到轴上和传输距离为 5 km 处的光强分布特性. 当大气能见度为 5 km、10 km, 折射率结构常数为 $C_n^2 = 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下的激光光束轴上和远场光强分布特性曲线如图 2 和图 3 所示.

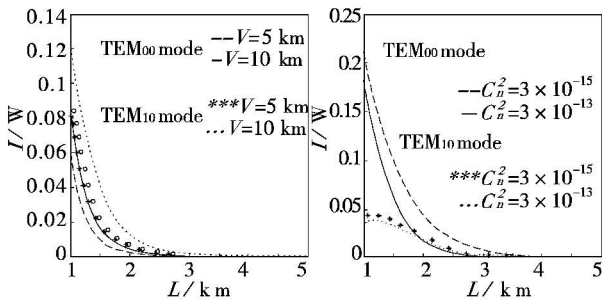


图 2 大气特征参数对轴上光强的影响 ($x = 0, y = 0$)

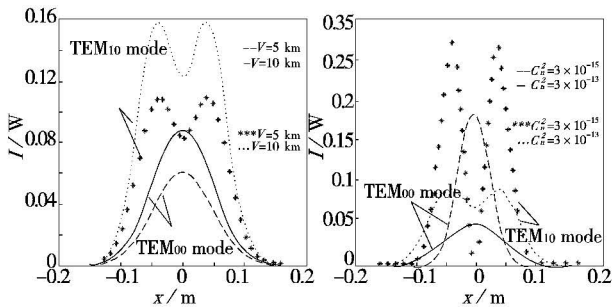


图 3 大气特征参数对激光远场光强分布的影响

图 2 表明, 随着传输距离的增加, 轴上光强逐渐减小, 能见度变低使得轴上光强减少. 同时从图 2 还可以看出, 传输距离相同时, TEM₁₀ 模 H-G 光束轴上光强衰减量高于 TEM₀₀ 基模 H-G 光束的光强

衰减量; 湍流强度越强, 轴上光强越小. 图 3 表明, 能见度增加, TEM₁₀ 模和 TEM₀₀ 模 H-G 光束的光强最大值增大, 光束展宽, 且 TEM₁₀ 模光强分布中央有凹陷; 湍流强度增大, 光束横向扩展.

根据 ITU-R 建议的结果^[7], 当波长大于 $0.8 \mu\text{m}$, 大气分子的 Rayleigh 散射对信号的损耗可以忽略不计. 因此, 对于近、中红外波段的激光大气传输衰减分析中, 波长处于大气窗口时, 大气分子引起的散射和吸收损耗可以不考虑. 常见的通信窗口在 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段附近. 所以选用激光通信中常用的工作波长 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$, 激光水平传输距离 $L = 5000 \text{ m}$, $C_n^2 = 3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2/3}$, 图 4 和图 5 表示不同传输激光波长和腰斑半径条件下的光强分布特性曲线.

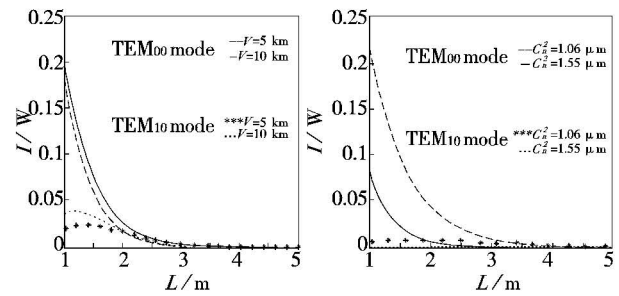


图 4 光束参数对轴上光强的影响 ($x = 0, y = 0$)

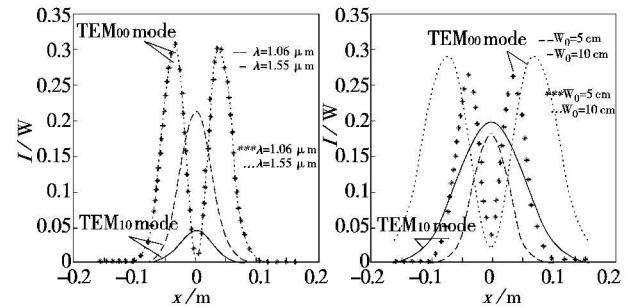


图 5 光束参数对激光远场光强分布的影响

从图 4 可以看出, 波长越短, 轴上光强衰减越快, 同时 TEM₀₀ 模 H-G 光束的轴上光强变化平缓; 光腰半径越大, 轴上光强越大. 图 5 表明, 传输激光波长对 TEM₀₀ 模 H-G 光束的光强分布影响显著, 而对 TEM₀₀ 模光束影响不明显; 从图 5 还可以看出, 传输激光的波长增大, 光强最大值降低; 光腰半径变大, 光强值增加, 同时光束明显展宽.

3 结 论

根据广义惠更斯-菲涅耳原理,对 TEM_{00} 基模和 TEM_{10} 模厄米-高斯光束在大气中的传输进行了计算,系统地分析了厄米-高斯光束经大气传输后,到达接收面的光强分布特性.分析结果表明,一旦了解激光束的特征参量和大气传输效应的参量,就可以确定激光束经大气随机信道传输后的激光远场光强分布特性.

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] C Y YOUNG, Y V GILCHREST, B R MACON. Turbulence induced beams spreading of higher order mode optical waves[J]. Opt. Eng., 2002, 41(5): 1097-1103.
- [3] H T EYYUBOGLU. Propagation of Hermite-cosh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere[J]. Optics Communications, 2005, 245(1-6): 37-47.
- [4] 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.
- [5] 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 1-40.
- [6] 李鑫, 张兴周, 吕科. 舰船激光通信中大气湍流对信道的的影响[J]. 应用科技, 2008, 35(4): 14-17.
- [7] 戴福山, 李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 191-196.
- [8] 张恩涛, 季小玲, 吕百达. 大气湍流对厄米-高斯光束质量的影响[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 28-31.
- [9] 周中亮. 高斯光束大气传输规律的数值分析[J]. 激光技术, 2009, 33(1): 110-112.
- [10] Comparison of Capacitive and Feedback-Interferometric Measurements on MEMS [C]//Journal of Microelectromechanical Systems, 2001.
- [11] 章秀华, 杨坤涛. 基于最大熵原则和灰度变换的图像增强[J]. 光电工程, 2007(2).
- [12] Christian Rembe, Rishi Kant, Richard S Muller. Optical Measurement Methods to Study Dynamic Behavior in MEMS [C]//JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, 2000.
- [13] Christian Rembe, Bernd Tibken, Eberhard P Hofer. Analysis of the Dynamics in Microactuators Using High-Speed Cine Photomicrography [C]//Journal of Microelectromechanical Systems, 2001.
- [14] Matthew R Hart, Robert A Conant, Kam Y Lau, et al. Stroboscopic Interferometer System for Dynamic MEMS Characterization [C]//Journal of Microelectromechanical Systems, 2000.
- [15] 靳志光, 卫建东, 张冠宇. 图像全站仪影像测量精度的测试与分析[J]. 测绘通报, 2008(2).
- [16] 王保丰, 唐歌实, 李广云. 一种月球车视觉系统的匹配算法[J]. 航空学报, 2008(1).
- [17] 宋丽梅, 周兴林, 徐可欣. 基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术[J]. 光学学报, 2005(9).

(上接第 5 页)

- [2] 图像和机器视觉产品手册[S]. 北京凌云光视数字图像技术有限公司, 2005.
- [3] 张洪涛. 钢板表面缺陷在线视觉检测系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [4] Ben Dawson, Simon Melikian. Application Machine Vision to Verification and Testing [C]//SME Technical Paper, Second Quarter 2004: 1-13/190.
- [5] Sun Dandan, Yang Yongying, Wang Fengquan, et al; Microscopic scattering imaging system of defects on ultra-smooth surface suitable for digital image processing [C]//Proc. SPIE, 2005.
- [6] Wang Fengquan, Yang Yongying, Sun Dandan, et al; Digital realization of precision surface defect evaluation system [C]//Proc. SPIE, 2005.
- [7] 邢汝佳. 基于 CMOS 图像传感器的成像系统研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007.
- [8] Daniel J Burns, Herbert F Helbig. A System for Automatic Electrical and Optical Characterization of Microelectromechanical Devices [C]//Journal of Microelectromechanical Systems, 1999.
- [9] Valerio Annovazzi-Lodi, Sabina Merlo, Michele Norgia.