

激光在大气中传输特性的仿真研究

付 强, 姜会林, 王晓曼

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要 大气对激光传输产生光强闪烁、光束漂移及光斑扩展等影响, 严重限制了激光通信、激光测距等系统的工作性能。因此全面开展大气信道中激光传输特性研究是十分重要和必要的。主要研究建立了大气吸收、大气散射衰减效应理论模型及光强起伏、光束漂移和光斑扩展等大气湍流效应影响模型。在分析各模型的基础上, 重点进行大气吸收、散射理论模型的仿真和大气湍流对激光传输特性影响模型的仿真。仿真结果表明: 大气的吸收和散射将对功率产生衰减; 大气抖动引起的激光散斑效应、光束偏折和扩展效应将影响跟踪精度和视轴对准精度; 大气湍流引起的光功率波动效应将影响通信的速率和误码率。

关键词 大气; 激光传输特性; 衰减效应; 湍流效应

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.012

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0057-05

激光在大气信道中进行传输时, 与信道中的各种微粒发生相互作用, 产生吸收和散射造成的大气衰减效应及大气湍流效应, 使得接收端产生激光功率衰减、光强闪烁、光束漂移以及光斑扩展等现象, 对激光通信、激光测距、激光告警、激光压制和激光探测等系统工作性能产生影响, 严重时甚至无法进行工作^[1]。大气对激光传输特性的影响见图 1。

在大气衰减效应方面, 1908 年由 G. Mie 提出了关于波在介质中传输的最早理论——Mie 理论。直到 1960 年 Rozenberg 对大气光散射的早期发展进行了详细地讨论。1976 年 E. J. McCartney 较详细的讨论了大气中的分子和气溶胶霾和云粒子的光散射。1978 年 A. Ishimaru 已较详细地讨论了波在离散随机介质中的传播问题^[2]。至今常用的理论和方法均基于以上研究成果。

在大气湍流效应方面, 国外在 20 世纪 50 年代后期, Tatarskii 采用 Rytov 近似法并引入现代湍流的统计理论成为现今处理弱起伏条件下光波传播的经典理论。在强起伏情况下, Tatarskii 的理论已不再适用。随后出现的将 Markov 近似引入求解光场的统计矩方程的方法得到了强起伏条件下的闪烁强度的渐进解, 提出了强起伏理论, 如 Markov 近似理论, 费曼路积分法, 薄屏理论以及启发式理论^[3]。

国内部分单位和研究院所在大气衰减、湍流理论方面进行研究, 取得了一些结论, 但依旧沿用国外现有理论, 尚无较新的研究成果^[4-6]。

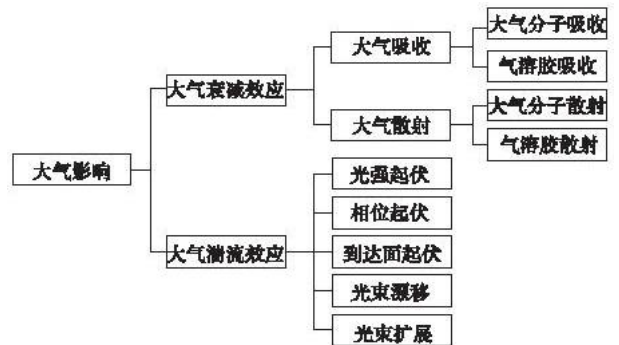


图 1 大气对激光传输特性的影响

Fig. 1 Classification of laser transmission characteristics in the atmosphere

* 收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家部委基金资助项目(A3620080230)

作者简介: 付 强(1984-), 男, 吉林长春人, 博士生, 主要从事激光大气传输特性及激光通信研究。

E-mail: strich@sina.com

1 大气衰减效应

1.1 吸收效应仿真

激光在大气中传输时,大气会对激光产生吸收作用。设强度为 I 的单色光通过厚度为 dh 的大气薄层,不考虑非线性效应,光强衰减量 dI 正比于 I 及 dh ,即:

$$dI/I = (I' - I)/I = \alpha dh \quad (1)$$

积分后得大气透过率为:

$$T = I/I_0 = \exp\left(-\int_0^L \alpha dh\right) \quad (2)$$

对于水平均匀光程,上式可以简化为:

$$T = \exp(-\alpha L) \quad (3)$$

此公式即描述大气衰减的朗伯定律,表明光强随传输距离的增加呈指数规律衰减。

斜程路径传输透过率可以表示为:

$$T = \exp\left[-\sec\varphi \int_0^H \alpha(\lambda, h) dh\right] \quad (4)$$

式中: λ 为激光波长; α 为大气衰减系数; L 为水平传输距离; H 为斜程路径的垂直高度; φ 为斜程路径的天顶角。对于斜程路径传输,大气消光系数随高度而变化,所以计算透过率时需要路径求积分。仿真不同衰减系数下的大气透过率与距离的关系见图 2。

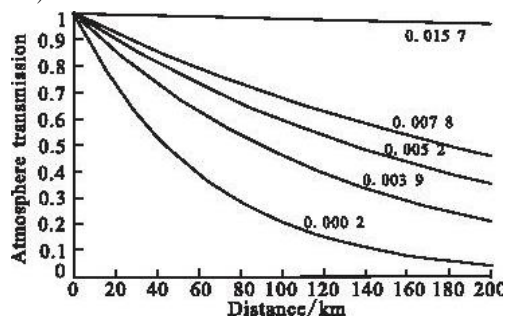


图 2 不同衰减系数下的大气透过率曲线

Fig. 2 Atmospheric transmission curve under different attenuation coefficient

1.2 散射效应仿真

大气的散射是由大气中不同大小的颗粒的反射或折射所造成的,这些颗粒包括组成大气的气体分子、灰尘和水滴等。纯散射没有能量的损失,它只是改变了能量的分配方向。大气对光束的散射可分为分子散射和粒子散射,在近地面大气层中,分子散射的影响是很小的,叫瑞利散射,散射系数随波长、海拔高度的变化而变化,见图 3-4。对任意波长,造成光能量衰减的主要是悬浮粒子的散射,叫米氏散射,散射系数的一般计算模型如下:

$$\sigma = \beta_a(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \quad (5)$$

式中: V 为大气能见度,单位为 km; λ 为激光波长,单位为 μm ; q 是不同能见度对应的常数,仿真结果见图 5。

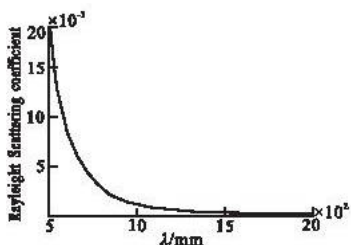


图 3 瑞利散射系数随波长的变化
Fig. 3 Variation of Rayleigh scattering coefficient with wavelength

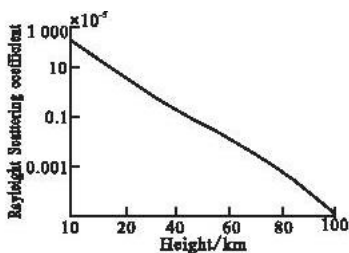


图 4 瑞利散射系数随海拔的变化
Fig. 4 Variation of Rayleigh scattering coefficient with height

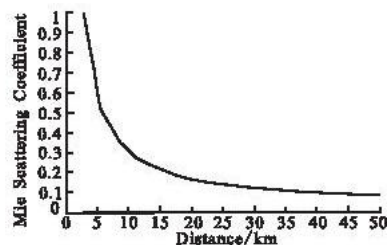


图 5 Mie 散射系数随距离的变化
Fig. 5 Variation of Mie scattering coefficient with distance

大气的吸收表现为当光波通过大气时,大气分子在光波电场作用下产生极化,并依入射光的频率作受迫振动,而光波为了克服大气分子内部阻力要消耗一部分能量,这个能量的一部分转化为其他形式的能量。当入射光的频率等于大气分子的固有频率时,就会发生共振吸收,此时吸收出现极大值。因此分子的吸收特性强烈地依赖于光波的频率^[7]。为了减少吸收引起的衰减,空间激光传输系统所使用激光的波长都选择在大气窗口附近。

2 大气湍流效应

2.1 光强起伏

2.1.1 弱湍流下闪烁方差仿真

使用 Kolmogorov 折射率起伏功率谱,可以求出平面波在大气湍流中传播时的对数振幅起伏方差为^[8]:
水平均匀路径:

$$\sigma_x^2 = 0.307k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (6)$$

斜程传输路径:

$$\sigma_x^2(L) = 0.56k^{7/6}[\sec\varphi]^{11/6}\int_0^L C_n^2(\eta)(L-\eta)^{5/6}d\eta \quad (7)$$

式中: C_n^2 为大气折射率结构常数; L 为传输距离; k 为波数; φ 为天顶角($\varphi < 60^\circ$), $\sec\varphi$ 为对斜程路径的修正因子。对于球面波传播情形,使用 Kolmogorov 折射率起伏功率谱,可得出对数振幅起伏方差为:

水平均匀路径:

$$\sigma_x^2 = 0.124k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (8)$$

斜程传输路径:

$$\sigma_x^2(L) = 0.56k^{7/6}[\sec\varphi]^{11/6}\int_0^L C_n^2(\eta)(\eta/L)^{5/6}(L-\eta)^{5/6}d\eta \quad (9)$$

已知大气湍流介质中的光波振幅为 A ,则光波的光强可写为 $I = A^2$ 。定义对数光强起伏方差 $\sigma_{\ln I}^2$ 为:

$$\sigma_{\ln I}^2 = \langle (\ln I - \langle \ln I \rangle)^2 \rangle \quad (10)$$

对于平面波水平传输,对数光强起伏方差可写为:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 1.23k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (11)$$

上式也称作 Rytov 方差,各种文献中常记作 σ_I^2 。通常用闪烁指数表征大气湍流引起的光强起伏的强弱,闪烁方差定义为:

$$\sigma_I^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2 \quad (12)$$

式中 I 为光强。图 6 给出了激光波长为 800 nm 时,不同大气折射率结构常数条件下,Rytov 方差随传输距离的变化关系。由图 6 可以看出:①当 C_n^2 为 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,在 6 km 至 20 km 传输距离范围内,Rytov 方差都相对较小;②当 C_n^2 为 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时,在 6 km 至 20 km 传输距离范围内,Rytov 方差都快速增加,实际上此时已经不满足弱湍流条件,需要用强湍流理论进行分析。

2.1.2 强湍流下闪烁方差仿真

人们对强湍流下闪烁指数的求解展开了广泛的研究,主要集中在 3 个方面:①用广义韦更斯-菲涅尔原理计算闪烁方差与斜方差;②推广和求解 Markov 近似方程;③用 Feynman 路径积分解波动方程,求解场的各阶矩和推测光强起伏概率密度。但是不同方法得出的结果并不统一,目前还没有得到强湍流下闪烁指数的一般解析表达式。

假设湍流内尺度小于平面波的空间相干长度 ρ_0 ,使用 Kolmogorov 折射率起伏谱,Andrews 导出了强湍流下的平面波闪烁指数计算表达式:

$$\sigma_I^2 = 1 + \frac{0.86}{(\sigma_I^2)^{2/5}} \quad (13)$$

式中 σ_I^2 为 Rytov 方差。对于球面波传播,有:

$$\sigma_I^2 = 1 + \frac{2.73}{(\sigma_I^2)^{2/5}} \quad (14)$$

根据理论分析得到的模型仿真的结果见图 7。

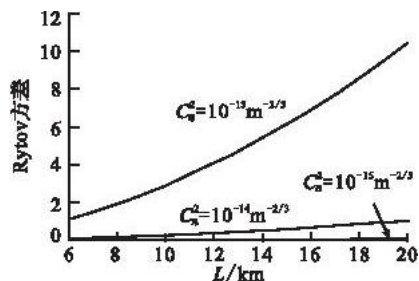


图 6 Rytov 方差随传输距离的变化关系
Fig. 6 Variance of Rytov with the transmission distance

2.2 光束漂移

因为湍流影响,大气折射率梯度随机变化,使得光束整体偏折,统计平均的中心位置发生随机跳动,导致接收机探测器接收到的信号功率减弱。强湍流环境下,光束可能分裂成多束较细的光束,这种情况极易造成系统通信中断。理论分析得到对于准直高斯激光束和对于会聚高斯激光束的模型见下式^[9]:

准直高斯激光束:

$$\langle \rho_c^2 \rangle_{\text{准直}} = 0.97 C_n^2 (2a)^{-1/3} z^3 \quad (15)$$

会聚高斯激光束:

$$\langle \rho_c^2 \rangle_{\text{聚焦}} = 1.10 C_n^2 (2a)^{-1/3} z^3 \quad (16)$$

式中: C_n^2 是大气折射率函数; a 是接收器半径; z 是传输距离。根据理论分析得到的模型仿真的结果见图8。一般的光束偏折: $50 \mu\text{rad} = 10''$;光束弥散: $10 \mu\text{rad} = 2''$ 。

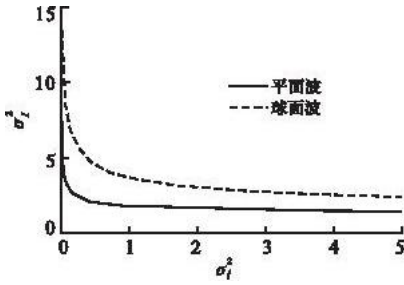


图7 Rytov 方差与闪烁指数之间的关系

Fig. 7 Variance of Rytov with the flashing index

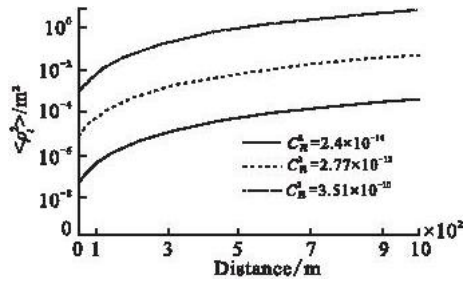


图8 光束漂移方差随传播距离变化关系

Fig. 8 Variance of beam drift with the propagation distance

2.3 光束扩展

光束扩展由衍射和湍流旋涡的扩展引起的,光斑面积的变化,造成光束展宽大于衍射展宽。降低了光束截面内的功率密度,使接收机接收到的光功率降低,恶化了系统性能。理论分析得到的长期曝光扩展、短期曝光扩展模型如下^[10]:

长期曝光,当 $z \ll (k_0^2 C_n^2 l_0^{5/3})^{-1}$ 时,扩展半径为:

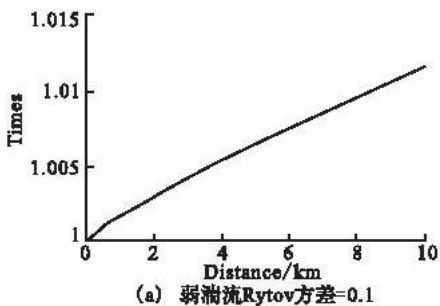
$$\langle a_L^2 \rangle = \frac{z^2}{k_0^2 a_0^2} + a_0^2 \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \frac{6.6z^3 \int_0^1 (1-\xi)^2 C_n^2(\xi z) d\xi}{l_0^{1/3}} \quad (17)$$

短期曝光,扩展半径为:

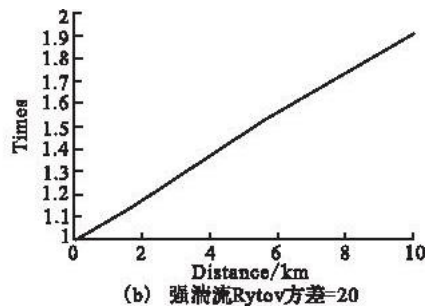
$$\langle a_S^2 \rangle = \frac{z^2}{k_0^2 a_0^2} + a_0^2 \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + z^2 \theta_s^2 \quad (18)$$

式中: $\theta_s = \begin{cases} 0.246 a_0 / \rho_0, & a_0 \leq 3 \rho_0 \\ 0.575 a_0 / \rho_0 [1 - 1.18 (0.95 a_0 / \rho_0)^{-1/3}], & a_0 > 3 \rho_0 \end{cases}$

仿真得到2种湍流天气下光束扩展倍数与传输距离的关系见图9。



(a) 弱湍流Rytov方差=0.1



(b) 强湍流Rytov方差=20

图9 光束扩展倍数与传输距离的关系

Fig. 9 Variance of expand times with the transmission distance

3 结束语

激光在大气中传输特性应在传输基础理论、实验验证方法和湍流新效应等方面进行广泛的研究。

1) 激光大气传输基础理论研究。研究激光受大气湍流、大气气溶胶衰减等单一效应影响机理,建立相应激光受上述单一效应影响机理模型,尝试研究多效应的相互耦合机制及其多效应共存时激光与大气相互作用机理。

2) 激光大气传输理论实验验证方法研究。研究激光大气传输理论实验验证方法,并建立与不同理论模型相对应、条件可变的室内模拟大气环境装置,演示验证激光大气传输基础理论,提供客观实验验证数据并对理论模型进行修正。

3) 激光大气传输湍流新效应研究。研究强起伏区相干半径的增加、闪烁残余效应、二次传输相位效应、后项散射放大效应、相位共轭镜反射效应^[7]等湍流新效应。

参考文献:

- [1] 王海先. 大气中激光通信技术 [J]. 红外与激光, 2001, 30(2):123-127.
WANG Haixian. Laser communications technology in the atmosphere [J]. Infrared and laser, 2001, 30(2):123-127. (in Chinese)
- [2] Arnon S, Sadot D, Kopeika N S. Analysis of optical pulse distortion through clouds for satellite to earth adaptive optical communication [J]. Journal of modern optics, 1994, 41(8):1591-1605.
- [3] Tatarskii. 湍流大气中波的传输理论 [M]. 温景嵩, 译. 北京: 科学出版社, 1998.
Tatarskii. Wave transmission theory of atmospheric turbulence [M]. WEN Jingsong, translated. Beijing: Science press, 1998. (in Chinese)
- [4] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(10):160-162.
YANG Huizhen, LI Xinyang, JIANG Wenhuan. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communication system [J]. Laser optoelectronics progress, 2007, 44(10):160-162. (in Chinese)
- [5] FU Qiang, JIANG Huilin, WANG Xiaoman, et al. The atmospheric environment simulation of virtual battlefield based on MAT modules. [C]//2010 Third international conference on modeling and simulation, IECMS 2010. Wuxi, Jiangsu: WAU press, 2010:423-426.
- [6] 梅海平, 饶瑞中, 吴晓庆, 等. 大气折射率结构常数和大气湍流谱的计算 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12):111-132.
MEI Haiping, RAO Ruizhong, WU Xiaoqing, et al. Evaluating refractive index structure constant and characterizing spectrum of atmospheric turbulence [J]. High power laser and particle beams, 2003, 15(12):111-132. (in Chinese)
- [7] 宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
SONG Zhengfang. The basis of the atmospheric optical [M]. Beijing: China meteorological, 1990. (in Chinese)
- [8] 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.
ZHANG Yixin. Transmission of light in random media and imaging [M]. Beijing: National defence industry press, 2002. (in Chinese)
- [9] Florian Moll, Markus Knapek. Wavelength selection criteria and link availability due to cloud coverage statistics and attenuation affecting satellite, aerial, and downlink scenarios [C]//Free-space laser communications VII. San Diego, California: ETATS-UNIS, 2007, 6706:1-12.
- [10] Ricklin Jennifer C, Hammel Stephen M, Eaton Frank D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J]. Journal of optical and fiber communications research, 2006, 3(2):111-158.

(编辑: 徐楠楠)

(下转第 80 页)