

·激光技术·

激光在复杂大气环境下传输特性的仿真

赵安新¹, 赵同刚²

(1. 河北石油职业技术学院, 河北 廊坊 065000; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要:随着激光技术的发展,激光复杂大气环境下的传输特性一直是激光领域的研究热点。综合激光大气传输的 Lambert-Beer 定律,结合瑞利散射、米散射等经典理论,设计出一套仿真系统,可以模拟激光在复杂大气环境中的传输过程。同时,为了得到经过湍流之后的最终光场,采用基于傅里叶变换的多层相位屏模拟湍流产生的随机扰动,仿真出光斑随传输距离的演变过程。

关键词:大气传输;散射;湍流;系统仿真

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0018-03

Simulation of Laser Propagation Characteristic in Complex Atmospheric Environment

ZHAO An-xin¹, ZHAO Tong-gang²

(1. Hebei Technical College of Petroleum Profession, Langfang 065000, China; 2. School of Electronic & Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As development of laser technology, the characteristic of laser atmospheric propagation is always hot spot in laser domain. Integrating Lambert-Beer law of laser atmospheric propagation, combining Rayleigh scattering and Mie scattering, a simulation system is designed. This simulation system can simulate the course of laser propagation in complex atmosphere. In order to obtain the final optical field through the atmosphere turbulence, the random disturbance could be simulated by a series phase screen which is based on Fourier transform. Lastly, the figure of light spot is drawn along with transmission ranges.

Key words: atmospheric propagation; scattering; atmospheric turbulence; system stimulation

随着激光技术的发展,激光在大气中远距离传输得到广泛应用,如星际激光通信、激光雷达、激光对抗等。由于大气层中存在着许多种气体以及各种微粒,如尘埃、烟、雾、雨、雪、风等使激光在传输中,光斑的变化具有复杂性。理论上,激光与大气中的分子、气溶胶粒子等发生相互作用,会产生线性与非线性效应,对传输特性产生影响。线性效应,包括大气折射、吸收、散射和湍流、大气气溶胶粒子的吸收。散射导致的辐射能量损失,大气湍流导致激光束的扩展与漂移。非线性效应,主要有热

晕、受激拉曼散射和大气击穿,这些因素严重影响了激光束的远场聚焦特性,使激光束产生漂移,焦距、焦深、焦点功率密度产生变化,造成激光束偏离原来的传输方向。这些效应对于激光通讯和其他需要高精度的空间光束捕获、对准和跟踪的激光应用技术影响很大。因此对激光大气传输效应的研究和准确评估,在二维和三维空间上给出激光在各种大气环境下传输演变过程,对解决激光通信中的主要问题十分关键,对提高激光应用的性能具有重要意义^[1,2]。

收稿日期:2011-01-17

基金项目:国家自然科学基金计划青年基金(61008049)

作者简介:赵安新(1968-),男,河北廊坊人,讲师,目前主要从事激光传输方面的研究工作。

1 仿真软件采用的理论模型

1.1 激光在大气中的吸收和散射模型

激光在大气中传输时会因吸收和散射而衰减。吸收是把辐射能变成其他形式能,而散射则会使传输方向发生偏离。大气分子对激光的吸收是由分子吸收光谱特性决定的。激光在大气中传输 L 距离后的功率,其衰减规律遵从 Lambert-Beer 定律^[3]

$$I = I_0 \exp\{-[\alpha(\lambda) + s(\lambda)]L\} \quad (1)$$

当传播光信号的大气气象条件为晴朗、霾、雾时,在大气水平均匀条件下,只考虑气溶胶的衰减,低层大气的主导衰减仅是米氏散射,吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 为^[4]

$$\alpha(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} L\right] \quad (2)$$

式中, V 为能见度; L 为传输距离; λ 为传输波长。 q 与能见度、散射粒子的大小和分布有关。当能见度最佳时, $q = 1.6$;能见度一般时, $q = 1.3$;能见度小于6 km 时, $q = 0.585V^{1/3}$ 。

散射系数 $s(\lambda)$ 与波长 λ 和能见度之间存在下列经验关系式^[5]

$$s(\lambda) = \frac{3.91}{V}\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-1} \quad (3)$$

当光波长远大于微粒尺寸时,即产生瑞利散射,瑞利散射光强的分布为

$$I' = I_0 \frac{(2\pi)^2 (n-1)^2}{\lambda^4 r^2 N_s^2} \times \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \quad (4)$$

其中, r 是散射中心 O 域观察点 P 的距离; n 为介质折射率; θ 是散射角度; a 为颗粒尺寸参数; D 为散射粒子直径。

当光波长相当于或小于微粒尺寸时,即产生米氏散射。米氏理论散射光的光强分布为

$$I' = I_0 \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 \gamma^2} \times (i_1 \sin^2\phi + i_2 \cos^2\phi) \quad (5)$$

1.2 湍流

如果大气处于湍流运动状态,其将导致折射率不断起伏,从而使得光波的振幅和相位产生随机起伏,造成光束的闪烁、弯曲、分裂、扩展及偏振状态起伏等现象^[6]。

当光束直径比湍流尺度大很多时,光束截面内包含多个湍流漩涡,每个漩涡各自对照射其上的光束独立散射和衍射,引起接收端光强忽大忽小的变

化。为了得到经过湍流之后的最终光场,仿真过程可以采用基于傅里叶变换的多层相位屏模拟湍流产生的随机扰动。在传输路径上设置若干个薄相位屏,这样,传输路径就可以看作是由真空和设置于其间的多个相位屏构成。仿真原理如图1所示。

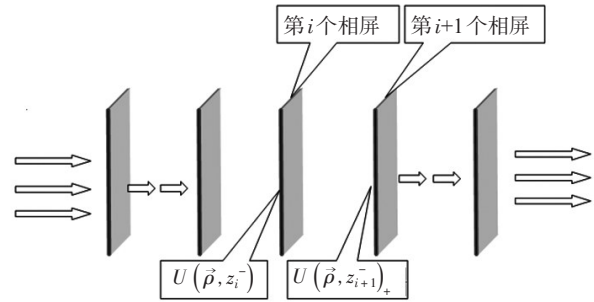


图1 利用相位屏模拟传输路径

仿真中,可以用一个经过柯氏谱调制的随机序列来模拟相位屏,再用快速傅里叶变换的方法(FFT)产生随机的相位屏^[7]。如式(6),相位屏产生的相位扰动叠加到初始光场

$$U(\vec{\rho}, z_i^+) = U(\vec{\rho}, z_i^-) \exp(i\theta(\vec{\rho})) \quad (6)$$

其中, z_i^+ 表示相位屏的右侧; z_i^- 表示相位屏的左侧。通过多个相位屏后,得到光场的表达式

$$U(\vec{\rho}, (n+1)z_i^-) = Ft^{-1}\{Ft\{U(\vec{\rho}, z_i^-) \times \exp(i\theta(\vec{\rho}))\} \times \exp[-i \frac{\kappa_{\perp}^2 \Delta z}{2k}]\} \quad (7)$$

除此之外,大气密度分布不均匀会出现激光传输路径弯曲,形成大气折射,即大气偏折效应^[8],激光在大气中传播时需要进行光路的修正。由几何光学理论可知,光线曲率决定于折射率的垂直梯度。实际中,该光线曲率主要与温度梯度有关,用 Γ 表示温度梯度,光程曲率可得

$$C = -33.17 + 0.964\Gamma \quad (8)$$

其中,冬季: $\Gamma = 0.03^\circ\text{C}/\text{m} = 30^\circ\text{C}/\text{km}$;夏季: $\Gamma = 0.2^\circ\text{C}/\text{m} = 200^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

由激光传输偏移角度 α 为: $\alpha = CL$,可以得到模拟的光程曲线变化。

2 激光大气传输仿真系统

为了对激光大气传输效应的研究和准确评估,在二维和三维空间上给出激光在各种大气环境下传输演变过程,仿真软件的计算流程是先根据理论模型得到中心光强的传输情况,模拟出激光在大气传输过程中衰减情况,再推算光束的光斑大小。

仿真计算过程是根据大气结构属性链表将相应的函数模块依次排序,对于每个大气采用逐层计算,前一段的计算结果作为后级的初始,依次叠代进行。并将各次叠代的结果,如传输长度、激光光强、发散角等中间数据保存到数据库中。在每段中,根据粒子尺寸进行区分,选择合适的模型。如:光波长远大于散射粒子尺寸,对应瑞利散射模型;当波长与粒子尺寸可比拟时,对应米散射模型;进行烟雾评估时,使用多次散射计算模型。利用仿真计算数据给出模拟过程中的任何一个时刻光束传输的状态,模拟出激光在各种真实气象环境下的传输过程中的线性与非线性效应。

仿真系统采用了三层体系架构,操作界面提示网络连接和数据库连接的状态信息,完成参数设置的初始化工作,包括平台参数(经度、纬度、高程等)、激光参数(功率、波长、出射束散角、脉宽等)、各种气象环境信息(包括温度、相对湿度、能见度、大气湍流因子等)。数据层操作包括查找、修改、增添大气情况和激光源参数,修改和维护函数模型。数据库是各种数据储存的位置,起到连接各个环节的重要作用。具体的整个仿真系统的控制流程设计见图2。

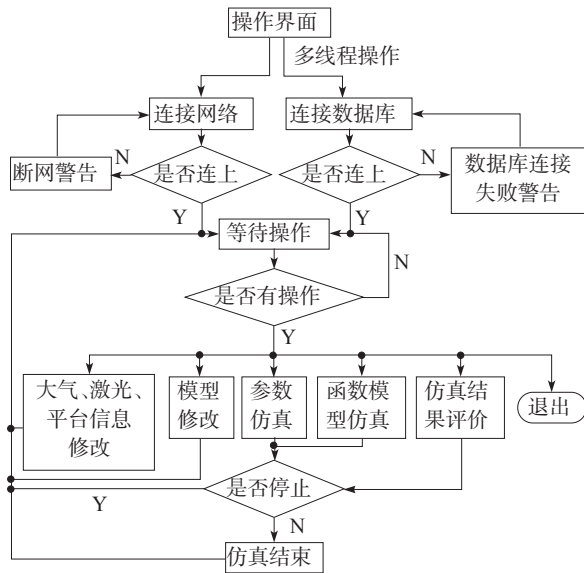


图2 操作界面控制流程

仿真计算产生的数据都存储于数据库中,根据该数据可以绘制出激光在大气中传输全过程的二维图形,并能够以三维图形进行单步观察。另外,仿真二维的传输全过程时,如果用不同的方式表示大气的状况,可以体现在背景上;激光在传输路径

上描绘为一个线段,线段的粗细表示光斑的大小,线段的颜色表示激光的功率。通过颜色的深浅,强度的亮暗或者表格与数据方式表现光功率的分布。

图3为仿真一个特定环境的截图,从界面上可以看到,系统使用了数据列表、二维图形、三维图形和曲线相结合的方式,从多个角度对仿真过程进行演示。

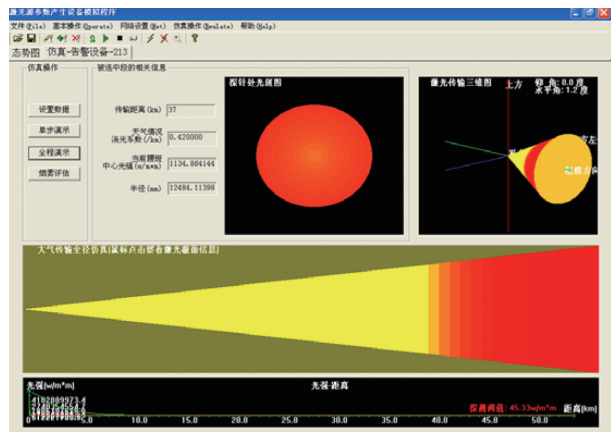


图3 仿真演示过程

从前面的分析得知,基于傅里叶变换的多层相位屏理论,相位屏可以模拟大气湍流产生的随机扰动。仿真中,在传输路径上设置若干个薄相位屏,根据式(6)、式(7)两式,再利用MATLAB矩阵运算能力,得到模拟高斯光束通过湍流大气后的结果,如图4a、图4b所示,展现了激光通过大气湍流前后,初始和接收光斑变化的情况。该仿真的气象条件

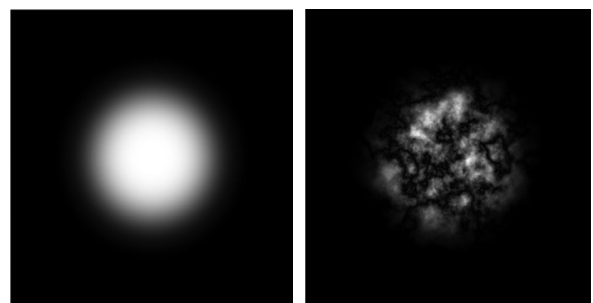


图4 激光通过大气湍流前后初始和接收光斑的对比

为:海平面,晴朗,常温(设湍流为各向同性);距离为:相屏数×间隔=20个×100 m=2 000 m;湍流强度为弱湍流(假设大气折射率结构常数 C_n^2 在 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 左右);初始光波长为850 nm。

(下转第34页)

涉波面有一定的拟合精度,采样点数多,也不一定能保证其精度一定高。

孙学真等人研究过测量设备精度和抽样点数目对拟合精度的影响,得出通过增加抽样点可以对由较低精度设备测得的数据进行较高精度拟合的结论。文中在研究 Zernike 多项式阶次对波面拟合精度的基础上,深入讨论了抽样点数目对拟合精度的影响,得出抽样点并不是提高精度的先决条件。对采用 Zernike 多项式来拟合干涉波面所得到的干涉波面函数与实际的光学干涉波面的接近程度有一定的促进作用。通过提高 Zernike 多项式拟合波面的精度,对实际高精度的检测波面面形有一定的指导意义,有利于更快更有效地分析被测波面。

参考文献

- [1] Daniel Malacara. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Cana-

da:John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007:538.

- [2] John Loomis. Fringe User's Manual[S]. Tucson: Version2, Optical Science Center of the University of Arizona, 1976.
- [3] 鄢静舟,孙厚环,高志强,等.用 Zernike 多项式进行波面拟合的一种新算法[J]. 数学物理学报, 2000, 20(3): 378-385.
- [4] 鄢静舟,雷凡,周必方,等.用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 119-128.
- [5] 魏学业,俞信.一种基于 Zernike 多项式的波前探测和重构方法[J]. 光学学报, 1994, 14(7): 719-723.
- [6] 龙夫年,郭秀梅,刘剑峰.利用 ZYGO 干涉仪进行非球面检测技术研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(2): 232-233.
- [7] 孙学真,苏显喻,荆海龙.抽样点对基于 Zernike 多项式曲面拟合精度的影响[J]. 光学仪器, 2008, 30(4): 7-10.

(上接第20页)

3 结论

通过总结激光大气传输仿真系统所需的基本理论模型,完善大气环境参数和激光源参数数据库。对激光通过复杂大气环境,如尘埃、烟、雾、雨、雪、风等产生的线性与非线性效应进行了探讨,对光斑在路径上的变化进行了模拟。

计算过程采用对大气结构分层处理、依次进行叠代的手段。在二维和三维空间上给出激光在各种大气环境下传输演变过程,并将各次结果保存到数据库。

从结果上看,该激光大气传输仿真系统提供了友好的图形界面,可以方便用户对相关数据进行录入与维护,同时可灵活设置仿真模型,并对激光源参数和大气环境参数进行选择,最后得到激光路径仿真和传输截面上光斑图形演示。经过测试,该系统在稳定性、功能性及其他各项性能上,都基本达到了较高水平。

参考文献

- [1] 朱文越,黄印博,钱仙妹,等.激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 451-458.
- [2] 董海燕,李伟,戴明,等.大功率光纤激光大气传输特性的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 830-832.
- [3] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社, 1990.
- [4] Charles S, Johnson Jr, Don A. Gabriel laser light scattering[M].New York: Dover Publications, Inc, 1981.
- [5] 李双刚,聂劲松,孙晓泉.大气折射和色散对激光传输的影响[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 679-682.
- [6] 张逸新,朱拓,陶纯堪.激光传输湍流大气的折射率起伏双尺度模型[J]. 光电子·激光, 2004, 15(10): 1247-1249.
- [7] C M Harding, R A Johnston, R G Lane. Fast Simulation of a Kolmogorov Phase Screen[J]. Appl. Opt., 1999, 38: 2161-2170.
- [8] 刘延武,何友金,任建存.海上激光低仰角大气传输研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 235-238.

欢迎投稿 nloe@vip.163.com