

大气湍流对激光信号传输影响的研究

张文涛, 朱保华

(桂林电子科技大学电子工程学院 广西 桂林 541004)

【摘要】 在不同的大气条件下, 分析和研究了大气湍流对激光信号传输时所产生的强度起伏、光束漂移、扩展和相位起伏及到达角起伏等现象, 并在此基础上设计了相应的实验方案, 对各种效应进行了具体测试。实验结果表明, 随机大气信道湍流效应对激光信号传输的影响很大, 在不同的条件下, 大气湍流效应的不同影响程度、湍流的强弱与阳光的强烈程度有关。晴天中午前后最强, 其他时间较弱。这为激光大气通信在大气湍流效应方面提供了一定的依据。

关键词 光束漂移; 光束扩展; 强度起伏; 湍流

中图分类号 TB851

文献标识码 A

Research on the Laser Beam Through Turbulence Atmosphere Channel

ZHANG Wen-tao, ZHU Bao-hua

(Department of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology Guilin Guangxin 541004)

Abstract In laser atmosphere communication technology, the characteristics of the atmosphere channel are very important for the communication system. Atmosphere turbulence causes the undulation of beam intension, the dithering and spreading of beam, etc. These affects of turbulence are analyzed and an experiment system is designed. The experiment results are given and discussed.

Key words beam dithering; beam spreading; intension undulating; turbulence

在激光大气通信技术中, 大气信道的特性对通信系统的影响是非常重要的, 其中大气湍流效应会造成通信过程中光束的抖动、强度起伏, 以及光束扩展和像点抖动等现象。为了解大气湍流的各种影响, 建立大气湍流效应模型, 利用特定的实验装置研究大气湍流对激光束传输的影响是目前激光通信技术中的研究热点。大气湍流运动是由于太阳辐射和各种气象因素所产生的大气温度的微小随机变化(1℃)所导致的大气风速的随机变化而形成。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。变化的累积效应导致大气折射率廓行的明显不均匀, 从而在湍流大气中传输的激光信号的波前也将作随机的起伏, 由此引起光束的抖动、强度起伏闪烁、光束扩展和像点抖动等一系列激光传输的大气湍流效应^[1-2]。这些大气湍流效应将严重影响空间光通信的稳定性和可靠性。为了能清楚地了解随机大气湍流效应对激光信号传输的影响, 本文具体分析了解随机大气信道湍流效应的各种影响机制, 并对不同条件下的随机大气信道湍

流效应进行了实验分析和研究。

1 大气湍流效应

大气不同部分的物理性质不同, 此外, 由于热和风的原因, 大气总是不停地流动, 从而形成温度、压强、密度、流速、大小等不同的气流旋涡。这些旋涡也总是处于不停的运动变化之中, 它们的运动相互关联、叠加, 形成随机的湍流运动, 这就是大气湍流。大气湍流运动使大气折射率具有起伏的性质, 从而使光波参量(振幅和相位)产生随机起伏, 造成光束的闪烁、弯曲、分裂、扩展、空间相干性降低、偏振状态起伏等^[3]。大气折射率结构常数会随高度和时间的变化而发生相应改变, 其变化情况分别如图1和图2所示。大气湍流对光束传输的影响, 与光束直径和湍流尺寸有密切的关系。当光束直径比湍流尺寸小得多时, 湍流的主要作用是使光束作为一体而随机偏折, 在远处的接收平面上光束中心的投影点(光斑位置)则以某个位置为中心而随机跳动, 即光束漂移。若大气湍流较强, 光束有可能会

漂移出可接收的范围,造成光通信的中断。而多数的情况是光束直径与湍流尺寸相当或比湍流尺寸大得多,此时光束截面内包含有许多的湍流漩涡,在长距离的光通信链路中,所传输光束达到接收端时会产生展宽效应。而且在光束波前的不同位置上可能会观察到不同的扰动现象,从而造成光束强度在时间和空间上的随机起伏,在某些位置光强忽大忽小,即为光束强度的闪烁^[4]。可以用大气折射率结构函数来表征湍流的强弱,其表达式为:

$$C_n^2(h) = (2 \times 10^{-3} Q^{4/3} h^{-4/3}) / [1 + 14000 u^3 / hQ]^{2/3} \quad (1)$$

式中 h 为高度; $Q = (Q_0 \sin \theta_E) - 50$ 为上升对流的热通量,该值与入射到地面的阳光、风速和地面自身的性质有关, θ_E 是太阳角; $u \approx 0.35h \left| \frac{\partial v}{\partial h} \right|$; v 为风速。大气折射率结构函数的变化非常复杂,对湍流效应而言总的变化趋势是:夏季比冬季强;晴天比阴天强,每日中午前后(10~15 h)较强,其他时间较弱^[5]。

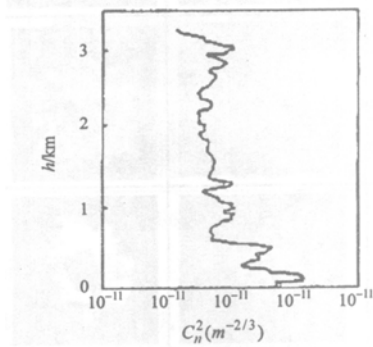


图1 折射率结构常数随高度的变化

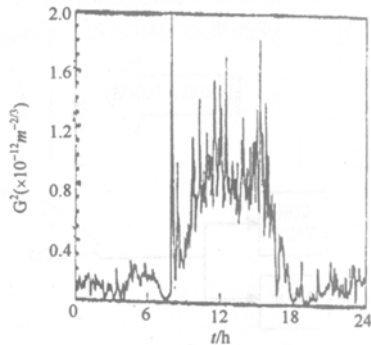


图2 折射率结构常数随时间的变化

2 大气湍流对激光信号传输的影响

激光束通过有湍流的大气传输时,其强度、相位和传输方向均会受到扰动而出现相应的随机变化。该变化情况与激光束束宽 ω 和湍流尺寸 l 的相

对大小相关,当 $2\omega/l \ll 1$ 时,湍流主要引起光束的随机漂移;当 $2\omega/l \approx 1$ 时,湍流使光束截面产生随机偏转,形成到达角起伏;当 $2\omega/l \gg 1$ 时,光束截面内包含许多湍流漩涡,引起光束强度的起伏、相位起伏和光束扩展^[6]。

2.1 强度起伏和大气闪烁

激光束的强度起伏通常用对数强度起伏方差表示,对数强度起伏方差为:

$$\sigma_m^2 I = AC_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

式中 L 为传输距离; A 为常数,对于球面波而言, $A = 0.496$,对于平面波而言, $A = 1.23$ 。当激光束在近地面水平传输时,若传输距离不是太远, $\sigma_m^2 I$ 可以达到1以上。实验表明, $\sigma_m^2 I$ 在达到1~2后将不再随湍流强度的增大和传输距离的增加而增大,相反,将有可能减小,该种现象即为闪烁饱和效应。可见光波段激光信号上行或下行穿过随机大气信道时, $\sigma_m^2 I$ 的值约为0.02,这种强度起伏不会对激光应用产生明显的影响^[7]。在弱起伏的情况下,可以利用微扰理论来描述强度起伏情况,表示为:

$$\delta_{mi}^2 = 1.23 q_n C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3)$$

式中 系数 q_n 取决于辐射孔径的衍射大小和光束发散度; C_n^2 为媒质折射率结构常数; k 为辐射的波数。

2.2 光束漂移和扩展

有限束宽的激光在湍流大气中传输时光束会出现漂移和扩展,当观察时间很短时,这两种效应基本上是独立的。但当观察时间较长时,扩展了的光束实际上包含了漂移的影响,此即为长期扩展。设短期扩展和长期扩展的激光光束宽度分别为 ω_s 和 ω_L ,则有:

$$\langle \omega_L^2 \rangle = \langle \omega_s^2 \rangle + \langle \omega_C^2 \rangle \quad (4)$$

式中 $\langle \omega_C^2 \rangle$ 为光束的重心平均平方值, $\langle \omega_s^2 \rangle$ 和 $\langle \omega_C^2 \rangle$ 的理论描述分别为:

$$\begin{cases} \langle \omega_s^2 \rangle = \frac{\rho^2}{2} [(a_r L)^2 + (1 - a_l L)^2] 4L^2 / k^2 r_0^2 \\ \langle \omega_C^2 \rangle = 1.709 C_n^2 L^2 D^{-1/3} \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_r 和 a_l 为光斑形状的两个参数; r_0 为球面波相干长度; D 为发射光学系统直径。

一般情况下湍流造成的光束扩展可以比光束自身的衍射极限大2到3个数量级,因而使通过随机大气传输的激光光强度降低。大气折射率的随机起伏所引起的激光束位置的漂移方差,可由式(6)估计:

$$\delta_m^2 = 1.7 C_n^2 z^2 (2a_0)^{-1/3} \quad (6)$$

式中 a_0 为初始光束半径; z 为传输距离^[8]。

2.3 相位起伏和到达角起伏

具有等相位波前的激光束通过随机大气信道传输时, 大气折射率起伏会导致激光束波前上的各点相位产生起伏。设 $\Delta n(r)$ 为两光路间的折射率之差, 则激光束在传输路径上距离为 r 的两条平行光路间的相位起伏:

$$\delta\varphi = kr\Delta n(r) \quad (7)$$

为正态分布, 其平均值大于 2π 。当偏移平均值的总相移具有正态分布时, 相位实际上均匀分布在 $0 \sim 2\pi$ 的范围内。相位起伏的影响还反映在相干长度 r_0 和等晕角 ψ_0 两个参数上。相干长度 r_0 是指激光束通过随机大气信道传输时, 在其横截面上两点间相位保持相干的最长距离。在相干长度内, 可以认为激光束的光波前是一致的。相干长度描述为:

$$r_0 = 0.185\lambda^{6/5} \cos^{3/5} \beta \left[\int_0^L C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (8)$$

式中 L 为传输距离; β 为天顶角, 即光束传输方向与地面垂直方向间的夹角。式(8)说明湍流越强、激光波长越短, 则相干长度越短。在可见光波段, r_0 的典型值是 10 cm, 变化范围大约在 $5 \sim 20$ cm^[9]。

等晕角 ψ_0 的物理意义是指在小于 ψ_0 的圆锥区域内, 激光束经过湍流大气传输所引起的相位畸变可以认为是等同的, 超出了等晕角范围, 相位测量就不再相关。 ψ_0 的计算为:

$$\psi_0 = 0.058 \lambda^{6/5} \cos^{3/5} \beta \left[\int_0^L C_n^2(h) h^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad (9)$$

在可见光波段, ψ_0 的典型值是 10 μ rad, 在 $3 \sim 20$ μ rad 间变化。激光在湍流大气中传输时, 光束截面的随机偏转会引到达角的起伏。到达角起伏的均方值 $\langle \theta^2 \rangle = D_\theta(r)/(kr)^2$, 对平面波相位结构函数 $D_\theta(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3}$ 。

3 光斑模拟和实验系统原理及实验结果分析

为了验证本文的理论模型和实际情况相符合的程度, 可用实验系统把实际的光斑记录下来, 同时利用软件模拟出同样条件下光斑的变化情况, 进而把二者进行对比, 从而确定所述的理论模型和模拟软件的优点及不足。在进行模拟时, 采用的是平面波方案, 波长 830 nm, 传输距离为 1.6 km, 出光孔径直径为 24 mm。对于不同的湍流强度, 其模拟光斑和实际光斑的对比如图3所示。模拟光斑用彩色显示, 红、黄、绿、蓝分别表示光强依次减弱。模拟软件中的大气折射率结构函数 C_n^2 的设置: 强湍流时 $C_n^2 = 10^{-12} m^{-2/3}$; 中等湍流时 $C_n^2 = 10^{-14} m^{-2/3}$, 弱

湍流时 $C_n^2 = 10^{-16} m^{-2/3}$ 。另外, 为了能够直观地了解空间大气随机信道由于湍流效应引起的扩散、闪烁、飘移等现象, 本文进行了一系列的实验研究。实验的基本原理是: 激光器发出的激光信号由光学发射天线准直后发射, 通过随机大气信道的作用, 在湍流效应的影响之下, 光束就会产生一系列的变化, 在接收终端前部利用暗室消除了部分背景光的干扰后, 光束照射在接收端的接收屏上; 在接收终端利用电荷耦合器件(Charge Coupled Devices, CCD)摄像机拍摄接收屏上的光斑, 并用录像机和CCD数据采集卡同时记录CCD所输出的视频信号, 以此来分析随机大气信道湍流效应对激光束所产生的影响。该实验系统的结构方框图如图4所示。

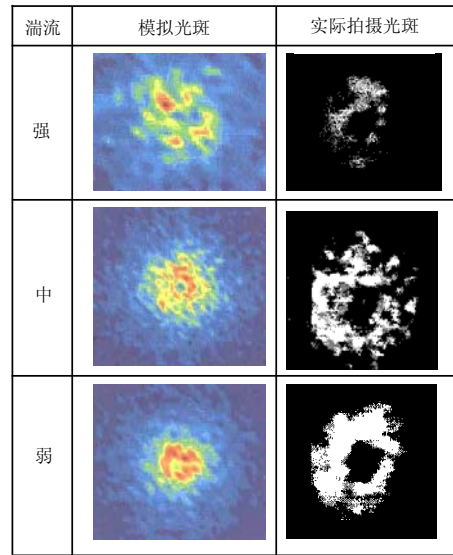


图3 光斑闪烁

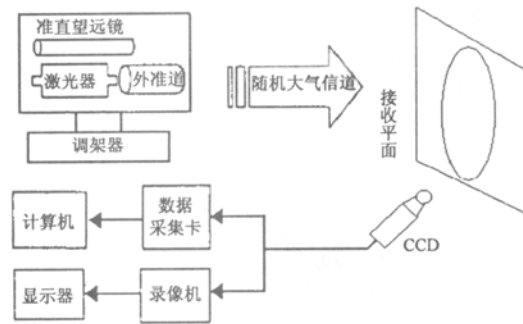


图4 实验系统方框图

4 测试结果

实验中所拍摄的每幅图长约 50 cm, 宽约 30 cm, 光斑直径约为 10 cm。图3给出了在湍流强度分别为强、中、弱时模拟情况下的光斑闪烁和实际拍摄的

光斑闪烁情况。图5给出了在弱湍流和强湍流条件下光波产生的相应光束扩展的现象。另外,当传输距离为1.6 km时,由于实验系统固定不动,对比各幅图中光斑的相对位置,可以看出光斑漂移的幅度约为2~4 cm,如图6所示。

随机大气信道湍流效应对激光信号传输的影响很大,使激光光斑出现闪烁、漂移,以及光斑分裂和光斑直径的改变即光束到达角的随机起伏。湍流的强弱与阳光的强烈程度有关,晴天中午前后最强,其他时间较弱,上述的各种效应都给空间光通信的接收带来了一定的困难。

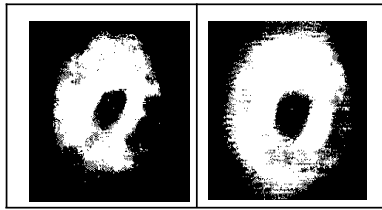


图5 光束扩展

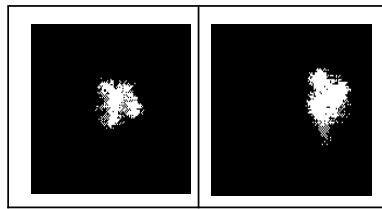


图6 光束漂移

5 结束语

本文通过对随机大气信道湍流效应的理论分析,分别给出了各效应对所传输的激光信号的影响,同时,结合理论分析进行了实验研究,给出了一系列测试结果,通过测试结果的对比分析,可以直观、

形象、准确地了解激光通过大气随机信道而引起的光斑的闪烁、漂移和分裂等现象,为大气随机信道的研究提供了很好的手段,对空间光通信技术具有较高的参考价值^[10]。

参考文献

- [1] WOOD B, CHAN V. Measurements performed during the limited-visibility laser experiment[J]. SPIE, 1998, 3266: 209-220.
- [2] PRIBIL K, FLEMING A. Solacos system implementation[J]. SPIE, 1995, 2381:143-150.
- [3] LEONID G K. Theory of tracking accuracy of laser system[J]. Optical Engineering, 1983, 22: 339-347.
- [4] LI Xiao-feng, HU Yu. Background light and at mospheric turbulence affecting the choice of space-to-ground laser communications links and communication time period program[J]. Laser Journal, 2004, 25: 61-63.
- [5] COCKSHOTT R, PURLL D. SILEX acquisition and tracking sensors[J]. SPIE, 1998, 2381: 206-213.
- [6] NAKAMORI A, YHISADA S. Present and future of optical intersatellite communication research at the national space development agency of Japan(NASDA)[J]. APIE, 1994, 2123: 2-13.
- [7] SWANSON E A, ROBERGE K J. Design considerations and experimental results for direct-detection spatial tracking systems[J]. Optical Engineering, 1989, 28: 659-666.
- [8] QIANG Xi-wen, ZHANG Hui. The attenuation effect of lidar signal[J]. Applied Optics, 2000, 21: 88-89.
- [9] ZHANG Yi-xin, CHI Ze-ying. Transmission and imaging of optical wave in atmosphere[J]. National Defence Industry Press, 1997, 121-125.
- [10] HU Yu, XU Chang-wu. The real-time display testing system of atmospheric influence on the laser transmission for its stochastic behavior[J]. Laser and Infrared, 2001, 31(6): 92-93.

编辑 税红