

文章编号: 1002-2082(2004)05-0033-04

利用CCD研究激光束在大气随机信道中的传输特性

张文涛¹, 朱保华²

(1. 桂林电子工业学院 电子工程系, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电子工业学院 计算科学与应用物理系, 广西 桂林 541004)

摘要: 介绍了无线光通信系统中激光信号通过随机大气信道时, 由于激光与大气介质的相互作用, 对光信号产生的散射、吸收和湍流等效应。上述一系列效应对激光信号的传输产生巨大的影响, 其中最为重要的影响效应有衰减、光束闪烁及抖动效应。通过一实验装置, 利用CCD对通过大气信道的光束在不同能见度、不同大气条件和不同时刻等条件下对激光传输信号的图像的拍摄及所拍摄的图像的对比分析, 验证了理论分析中的各种大气随机信道的效应。

关键词: 光通信; 大气随机信道; CCD

中图分类号: TN929.12-34

文献标识码: A

The Study for Laser Beam Transmission Character in Atmosphere Randon Channel by Using CCD

ZHANG Wen-tao¹, ZHU Bao-hua², LI Xian³

(1. Dept. of electronic engineering, GLIET, Guilin 541004 China; 2. Department of Information Material Science and Engineering, GLIET, Guilin 541004, China)

Abstract: Some effects that affect the transmission in atmosphere of laser signals are introduced. Some phenomena, such as the absorption, dispersion and onflow of aerosol, dust, fog, rain and haze, are engendered by the interaction of laser and atmosphere when the former goes through the latter. These all will produce some other effects that would strongly affect the transmission of laser signals, especially attenuation, coruscation and dithering of beam. They can be experimentally validated through a set of device besides CCD that can shoot and analyze the images of laser signals on conditions of different visibility, atmosphere and time.

Keywords: optical communication; atmosphere random channel; CCD

引言

在空间光通信系统中, 由于所涉及的是随机的大气信道, 其中大气气体分子、气溶胶离子、尘埃、雾、雨和霾等对激光信号的吸收、散射以及大气湍流效应使得激光信号在传输过程中产生光斑闪烁、光束漂移和光斑分裂, 这都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信

道对激光信号传输的影响, 本文具体分析了随机大气信道的各种影响效应, 并对不同条件下的随机大气信道进行了实验研究。

1 大气散射效应

大气中各种微粒的直径分布很宽, 从 $10^{-4} \mu\text{m}$ 到数十微米。对激光信号传输影响最大的是直径从0.1

收稿日期: 2003-07-28; 修回日期: 2003-10-18

基金项目: 国防科研基金资助项目(69782009)

作者简介: 张文涛(1976-), 男, 山东济南人, 讲师, 现从事蓝绿激光对潜通信系统的研究工作。

μm 到 $10\ \mu\text{m}$ 的微粒,对此可采用单原子的散射理论即瑞利(Rayleigh)散射和米耶(Mie)散射来近似分析大气的散射。这是因为气体分子间距大于分子直径十倍以上时,大气中气溶胶微粒或悬浮微粒的间距也远大于微粒直径,满足单粒子散射的条件。

1.1 瑞利散射系数

当激光信号的波长远大于散射粒子尺寸时,发生瑞利散射,散射系数为

$$\alpha_m(\lambda) = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N\lambda^4} \quad (1)$$

式中, N 为单位体积内的粒子数, λ 为波长; n 为媒质折射率。

在干燥清新的空气中,瑞利散射系数为

$$\alpha_m(\lambda) = 1.09 \times 10^{-3} \lambda^{-4.05} \text{ km}^{-1} \quad (2)$$

由(2)式可知,散射系数和波长的四次方成反比,波长越小,散射越强。

一般而言,对于半径 $r \leq 0.03\ \mu\text{m}$ 的粒子,波长在 $1\ \mu\text{m}$ 附近时,瑞利散射的误差 $\leq 1\%$ 。

1.2 米耶散射系数

当微粒的尺寸和波长比较接近时,则可产生米耶散射。米耶散射适用于如小雨、雾滴、霾等球形粒子。米耶散射系数可由下式确定:

$$\alpha_m = \pi N(r) Q_s(X_r, m) r^2 \quad (3)$$

式中, $N(r)$ 为单位体积中的粒子数; r 为粒子半径; Q_s 为散射效率,定义为粒子散射的能量与入射到粒子几何截面上的能量之比,它是粒子的相对尺度 $X_r = 2\pi r/\lambda$ 和复折射率 $m = n - iK_s$ 的函数, n 和 K_s 分别为复折射率的实部和虚部。

当粒子在半径 r_1 和 r_2 之间连续分布时,米耶散射系数由下述积分求得:

$$\alpha_m = \pi \int_{r_1}^{r_2} n(r) Q_s(X_r, m) r^2 dr \quad (4)$$

式中, $n(r)$ 为单位体积中半径分布在 $[r, r+dr]$ 之间的粒子数。

2 大气吸收效应

对可见光和红外光而言,分子的散射作用比较小,但分子的吸收效应对任意光波段都是不可忽略的。气体分子的大量吸收谱线组成了谱带群,对光辐射产生线吸收和连续吸收,仅在少数几个波长区吸收较弱,形成了所谓的“大气窗口”。图1是地球表面大气对太阳辐射的吸收情况。由图可见,最重要的大气窗口有可见光波段 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 波段和 $8 \sim 13\ \mu\text{m}$ 波段,这些波段对于空间光通信技术是非

常有用的。

在计算大气分子及气溶胶对激光信号的吸收时,可以用普通单色光的传输理论来进行。

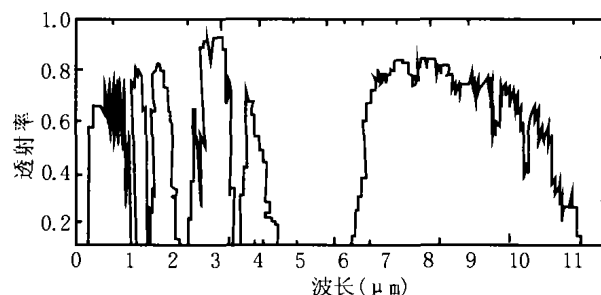


图1 大气透射率

Fig. 1 Transmission ratio of atmosphere

2.1 分子线吸收

当激光信号在 $20\ \text{km}$ 高度以下的低层大气信道中传输时,激光信号的吸收谱线宽度主要由分子碰撞所引起的压力加宽决定,该谱线形状近似为洛伦兹线型,吸收系数为

$$K_{ml} = \frac{S}{\pi} \frac{\gamma_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma_L^2} \quad (5)$$

式中, γ_L 为洛伦兹线半宽度,对于地面附近的大气层为 $0.01 \sim 0.1\ \text{cm}^{-1}$; ν 为激光的波数; ν_0 为激光谱线的中心波数; S 为谱线的积分强度。

当激光信号在 $60\ \text{km}$ 高度上的高层大气信道中传输时,其吸收系数由多普勒展宽线型公式给出:

$$K_{mD} = \frac{S}{\alpha_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\ln 2 (\nu - \nu_D)^2 / \gamma_D^2} \quad (6)$$

上式, γ_D 为多普勒谱线半宽度。大气气体的多普勒展宽半宽度大致介于 $6 \times 10^{-2}\ \text{cm}^{-1}$ ($0.2\ \mu\text{m}$ 附近的氧吸收)到 $3 \times 10^{-4}\ \text{cm}^{-1}$ ($50\ \mu\text{m}$ 附近的水汽吸收)之间。

而在 $20 \sim 60\ \text{km}$ 高度之间时,碰撞展宽和多普勒展宽同时起作用,此时大气分子的吸收系数由伏格脱线型给出:

$$K_{mV} = \frac{y^{k_0}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2} [y^2 + (x - t)^2] dt \quad (7)$$

式中, $k_0 = S/\gamma_D \pi^{1/2}$; $y = \gamma_L/\gamma_D$; $x = (\nu_0 - \nu)/\gamma_D$ 。

2.2 分子连续吸收

随着光频率连续缓慢变化的分子吸收称为分子连续吸收。连续吸收的机理目前还未充分了解。Kneizys 等人根据 Burch 及其同事的实验结果给出了水汽连续吸收系数在 $0 \sim 2000\ \text{cm}^{-1}$ 范围内的经验公式:

$$\alpha_c = \rho_s \tanh\left(\frac{h\nu}{2kT}\right) \times \left[\frac{\rho_i}{\rho_0} C_i(\nu, t) + \frac{\rho_f}{\rho_0} C_f(\nu, t) \right]$$

式中, $hc/k = 1.43879 \text{ cmK}$; ρ_s, ρ_f, ρ_0 分别是水汽, 其他气体和参考数密度。

3 散射和吸收的共同影响

激光大气信号在随机大气信道中传输时, 大气的吸收使光能量随距离的增大而减小。大气的散射表现在两个方面: 一是减小传播方向上的光能量; 二是改变光斑的光强度分布, 使光斑内部有明暗之分。大气的吸收和散射的共同影响则主要表现为大气衰减。用大气透射率来度量, 单色波的大气透射率可以表示为

$$\tau(\lambda) = \exp\left(-\int_0^z \alpha(\lambda) dr\right) \quad (9)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为波长 λ 时的大气透射率; z 为传输距离; $\alpha(\lambda) = \alpha_m + \alpha_s$ 为总的衰减系数, 其中 α_m 为散射系数, α_s 为吸收系数。

对于水平均匀光程传输, 有: $\tau(\lambda) = \exp[-\alpha(\lambda)z]$; 而对于斜程传输有: $\tau(\lambda) = \exp[-\sec\varphi \int_0^H \alpha(\lambda) dh]$, 式中 φ 为天顶角, H 为倾斜高度。

通常情况下大气透射率和能见度的经验公式为

$$\tau(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} \times z\right] \quad (10)$$

式中, V 是能见度, 其单位为千米, z 为传输距离, 其单位也是千米; λ 为波长, 其单位是微米; q 是与波长有关的常数, 对于红外波段 q 的取值为

$$q = \begin{cases} 1.6 & V \text{ 较大} \\ 13 & \text{中等能见度} \\ 0.585 V & V < 6 \text{ km} \end{cases}$$

4 大气湍流效应

大气不同部分的物理性质不同, 同时加之热和风的原因, 大气总是处于不停的流动, 从而形成温度、压强、密度、流速和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, 他们的运动相互交联和叠加, 形成随机的湍流运动, 这就是大气湍流。由于大气湍流的存在, 大气中局部温度及压强等参数的随机变化引起大气密度的随机变化, 导致激光信号在大气中传输时出现两种效应: 第一种是光在大气中传输时, 波阵面产生随机畸变, 传播方向发生随机偏转; 第二种是在观察平面上产生光照度随机起伏, 光斑内部强度发生随机变化, 即所谓的光斑闪烁和漂移。

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

$$C_n^2(h) = \frac{2 \times 10^{-3} Q^{4/3} h^{-4/3}}{\left[1 + \frac{14000 u^3}{h Q}\right]^{2/3}} \quad (11)$$

式中, h 为高度(单位 m); $Q = (Q_0 \sin \theta_E) - 50$ 为上升对流的热通量(单位 Wm^{-2}), 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; $u \approx 0.35h \left| \frac{\partial v}{\partial h} \right|$ (单位 ms^{-1}); 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点~15点)较强, 其他时间较弱, 其变化情况见图2。

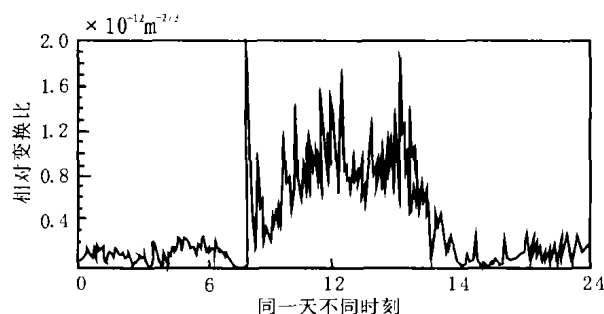


图2 折射率结构常数一天内的变化

Fig. 2 The change of refractive index configuration constant in a day

5 实验系统的原理及组成

为了直观地了解空间大气随机信道因散射、吸收和湍流等效应引起的衰减、扩散、闪烁、漂移和分裂等现象, 我们进行了一系列的实验研究。其基本原理是: 激光器发出的激光信号由发射天线准直发射后, 通过随机大气信道的作用, 消除了部分背景光的干扰后, 照射在接收端的接收屏上, 利用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。该实验系统的结构如图3所示。

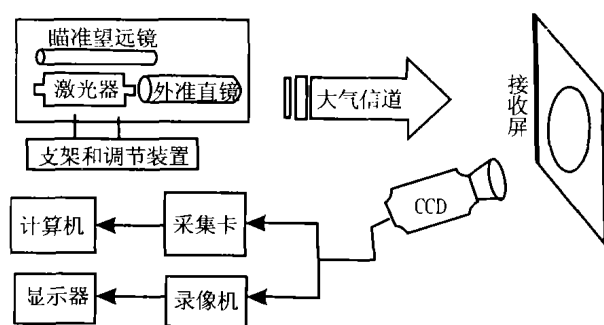


图3 实验系统结构方框图

Fig. 3 Block diagram of construction for test system

6 测试结果与结论

测试结果见表1~表4。

表1 不同大气条件同一时刻的测试结果

Table 1 Test results at the same time in different air conditions

	晴天	阴天	雾天
中午 12:00			
晚上 9:00			

表2 同一天不同时刻的测试结果

Table 2 Test results at different time of same day

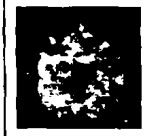
	10:00	12:00	11:00
晴天			
阴天			

表3 不同能见度下的测试结果

Table 3 Test results under the condition of different visibility

能见度	>5 km	3.5 km	3 km
			
能见度	2.5 km	2 km	1.5 km
			

表4 光斑漂移的测试结果

Table 4 Test results as spot drifting



当传输距离为2 km时,实验中大部分的光斑漂移为2~4 cm。

随机的大气信道对激光传输的影响很大,它能够使激光光斑出现闪烁、漂移、分裂和直径改变即光束到达角出现随机起伏。散射和吸收使得传输过程中的光强度受到衰减,光斑的强度分布发生改变。湍流的强弱与阳光的强烈程度有关,晴天中午前后最强,其它时间较弱。雾对激光的吸收和散射影响都很大,浓雾甚至可以使通信中断。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。本文通过对各种主要大气效应的理论分析,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、形象且准确地了解激光通过大气随机信道而引起光斑的闪烁、漂移和分裂等现象。

参考文献:

- [1] 强希文,张辉,等.激光雷达信号大气衰减效应[J].应用光学,2000,21(4):21-23.
- [2] 张逸新,迟泽英.光波在大气中的传输与成像[M].北京:国防工业出版社,1997.91-93.
- [3] 胡渝,许昌武.激光通过大气随机信道远场二维强度分布实时测试系统[J].激光与红外,2001,31(6):330-331.