

文章编号: 1001-3806(2010)04-0478-04

双波长激光传输特性的室内模拟实验研究

袁纵横^{1,2}, 张静³, 张文涛²

(1. 贵州民族学院 物理与电子信息科技学院, 贵阳 550025; 2. 桂林电子科技大学 电子工程学院, 桂林 541004; 3. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究大气信道在特定条件下对光束的影响, 建立基于双波长同信道传输的室内模拟大气实验系统, 对不同浓度的雾气和粉尘分别进行了模拟传输实验。结果表明, 空气水蒸气密度与衰减系数近似满足线性关系, 且衰减系数随波长变大而减小, 当雾气浓度达到一定时趋于一致; 根据测量数据拟合出粉尘浓度与透射率满足指数关系, 符合比尔-郎伯定律; 实验测试数据结果与大气散射理论相符合。该实验结果和实验方法对研究大气对光的作用具有一定的参考价值。

关键词: 光通信; 大气信道; 室内模拟实验; 衰减系数; 粉尘浓度; 透射率

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.013

Indoor simulation experiment study about transmission characteristics of dual wavelength laser

YUAN Zong-heng^{1,2}, ZHANG Jing³, ZHANG Wen-tao²

(1. Department of Physics and Electronic Information Science, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550025, China; 2. School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to study effect of atmospheric channel on the beam quality under special circumstances, an indoor experiment system was built to simulate the situation dual wavelength laser passing in the same channel. Experiments were carried out under the conditions of different concentration fume and dust. It was found that attenuation coefficient linearly changed with air vapor density, the attenuation coefficient changed smaller with longer wavelength, and that it tend to the same when fume density reached to some extent. On the basis of measurement data, transmittance changed with dust concentration exponentially, which coincided with Beer-Lambert law. Experimental test data results accorded with atmospheric scattering theory. The results have reference value to study about atmospheric influence on light.

Key words: optical communication; atmosphere channel; indoor simulation experiment; attenuation coefficient; dust concentration; transmittance

引言

大气激光通信^[1]作为一种非常好的无线通信手段, 是以大气作为传输媒介。自激光出现以来, 众多学者对它进行了很多理论上和实验上的研究, 能否将之变为现实, 从而推广应用的关键在于大气激光通信系统能否克服气候因素的影响, 实现全天候通信。然而, 当光束在大气信道中传输时, 会受到大量的气体分子、水雾、气溶胶、霾等大气分子的影响, 造成光信号的吸收和小粒子

的瑞利散射、大粒子的 Mie 散射, 导致光信号在随机大气信道中传输一段距离后所产生的损耗具有随机性, 甚至导致通信中断。即使天气状况良好, 大气因素对激光信号的影响也不能忽略。由于雾和粉尘是大气中最常见的散射粒子, 在环境污染较大的地区, 大气散射成为大气无线光通信信道传输的重要特性之一。研究大气对光的作用, 不仅在光通信, 在卫星遥感、大气监测、环境保护等方面都有重要意义。故研究雾和粉尘对激光信号传输的影响具有很重要的现实意义。

迄今文献中报道的研究都是针对单一波长激光在大气中的传播特性, 对不同波长激光在传输时所受影响的比较是在不同信道中测量得到^[2]。大气环境始终是变化着的, 不同地点、时间的信道特性是不同的。为了弥补单一波长实验的不足, 课题组建立了双波长在同信道中传输的室外实验系统进行了室

基金项目: 贵州省高层次人才科研特助经费资助项目 (TZJF200622)

作者简介: 袁纵横 (1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事光信息处理及光通信的研究。

E-mail: yuanzongheng@sina.com

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-09-27

外实验^[3]。为了补充全天候条件所缺少的环境状况,更好地研究烟尘和雾气对激光传输的影响,作者设计制作了实验池,在室内模拟大气环境来研究雾气散射和粉尘对激光传输的影响,对大气环境进行简化的模拟,并对同一信道中传输的两种波长激光束产生的不同影响进行比较,为建立大气随机信道模型提供了有力的依据。

1 大气散射理论

大气中的气体分子、气溶胶粒子和水汽凝结物都会引起光的吸收和散射,吸收和散射的共同作用表现为大气衰减,这会严重降低传输光辐射的强度。大气对光的吸收作用在可见光波段十分微弱,在衰减计算时可以忽略不计,因此,在以下的建模中只考虑大气的散射作用。由于激光具有极好的单色性,在光传输路径上大气均匀或分层均匀的情况下,其传播特性可以用 Bouguer-Lambert 定律描述^[4]:

$$I = I_0 e^{-\alpha(\lambda)z} \quad (1)$$

式中, z 为传输距离; I_0 和 I 分别是波长为 λ 的激光束的初始光强和在距离 z 处的光强; $\alpha(\lambda)$ 是与波长有关的衰减系数。

1.1 雾气对光通信的影响

雾气影响人的视野,此程度可以用能见度来表征。能见度与消光系数满足简单的线性关系,用消光系数来衡量雾气浓度^[5]。若用 N_0 表示雾滴浓度, a_e 表示雾滴的有效平均半径,则消光系数可以表示为:

$$r = 2N_0 \pi a_e^2 \quad (2)$$

由(2)式可得液态水含量为:

$$l_w = \frac{4}{3} \pi a_e^3 N_0 \quad (3)$$

则能见度可以表示为:

$$R_m = \frac{2.62a_e}{l_w} \quad (4)$$

a_e 的单位是 μm , r 的单位是 $1/\text{cm}$, l_w 的单位是 g/cm^3 , R_m 的单位是 m ^[5]。

1.2 粉尘对光通信的影响

由于现代工业的污染严重,使大气中的悬浮颗粒增多,影响了大气通信的质量。粉尘微粒对可见光、红外、微波的遮蔽和干扰特性,通常可用透射率、衰减率、消光系数等来表征。激光透射后的光强与透射前的初始光强的比值称为透射率。其计算公式为:

$$T = \frac{I_1}{I_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中, T 为透射率, I_1 为透射后光强,单位为 cd , I_0 为透

射前初始光强,单位为 cd 。

粉尘的消光能力可用消光系数来评价,它表征粉尘对激光衰减的能力大小。消光系数愈大,该粉尘遮蔽的效果就愈明显。计算消光系数的实验测定法所依据的基本原理是比尔-郎伯定律,其公式如下^[6]:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{CL} \ln \left[\frac{I_0'(\lambda)}{I_1'(\lambda)} \right] = -\frac{1}{CL} \ln T(\lambda) \quad (6)$$

式中, α 为烟雾的质量消光系数,单位为 m^2/g ; C 为质量浓度(单位体积内粉尘微粒的质量); L 指光程长,单位为 m ; λ 为波长,单位 μm 。 I_0' 为光照射到粉尘上的强度, I_1' 为光透射粉尘后的光强,单位均为 cd 。

由(6)式可知,在进行实验测定时,如果已知烟尘粉粒的质量浓度,只要测出激光在粉尘中的透过率 T ,再由已知光程 L ,即可由上式计算粉尘的质量消光系数。通过计算质量消光系数,就可以比较出不同粉尘对激光的遮蔽能力的强弱。

2 室内模拟大气传输系统

由于室外实验易受气候环境的影响,多种气候因素同时作用使得很难找出单一变化量对大气通信影响的规律。所以作者采用室内模拟大气环境形式,进行实验研究。图1为实验原理图,红光和蓝光两束激光

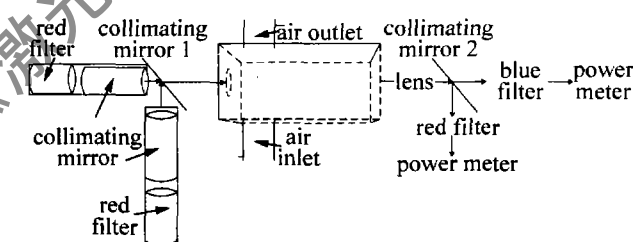


Fig. 1 Structure principle chart of experiment system in door

分别由激光器发出到达分光镜。分光镜1用作合波器,使两束光汇聚在一起,在同一信道中传输。在接收端,通过透镜把接收到的激光汇聚,然后用分光镜2把接收到的激光分为两束,在两个探测器前分别放置蓝光和红光滤光片,减少光噪声。这种方法体现了双波长的同时同通信条件传输。

装置图中的容器是实验池。容器前后两侧分别用石英玻璃密封。石英玻璃相对于其它材料对于可见光来说损耗较小,利于测量。容器的上下两个表面各开了两个小孔,并插入塑料导管,利于使实验室内的雾气和烟尘保持均匀。

为了增加实验中光传输距离,利用了直角棱镜,如图2所示。探测光束在实验池内往返的次数 N 与直角棱镜 D_1, D_2 的各自直角棱的两对称面的间距 d 有关。在光束直径比间距 d 小时,探测光束在实验池内往返的次数 N 为^[7]:

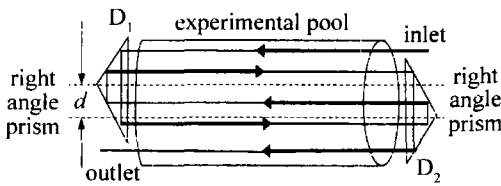


Fig. 2 Principle chart of simulation experimental pool

$$N = \text{int}\left(\frac{h}{d}\right) + 2 \quad (7)$$

式中, int 为求整符号, h 为入射光束到直角棱镜 D_1 底部 45° 角棱边的距离。调节间距 d 即可调节探测光束在气室内往返的次数 N 。

2.1 雾气实验与结果分析

本实验中雾气环境是通过人工形式来产生的, 以此来模拟大气中的雾环境。雾粒子发生器采用超声波加湿器, 产生的雾滴半径大小可以由超声波频率确定, 且在真实雾的粒径范围内, 故可用此来模拟自然界的雾滴。不同温度下, 雾粒子的浓度和有效半径变化会影响测量结果, 所以, 尽量在恒定温度下来研究雾气浓度及光波长对光功率的影响。

由于雾对 473nm 和 633nm 的光吸收较小, 在整个传播过程中吸收不予考虑, 光强的减小看作是散射的作用。为了尽量避免大气湍流给激光传输带来的影响, 故在导入雾之后, 需待实验池中的雾稳定下来之后方可测量。激光在实验池中传输没有形成等离子通道, 一些相关的非线性效应也可忽略。

取温湿计的平均值作为实验池内的相对湿度。已知相对湿度则可以算出绝对湿度, 根据回归分析法得到在 $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 饱和水蒸气密度 y 与温度 x 的回归方程^[8]:

$$y = 0.01 \times (0.00315x^2 - 0.027x + 1.0091) \quad (8)$$

如果用 p 表示某温度时空气的水汽压, 用 P 表示同一温度下水的饱和汽压, 用 B 表示相对湿度, 那么:

$$B = \frac{p}{P} \times 100\% \quad (9)$$

从而得到某一温度时实验池的绝对湿度(空气水蒸气密度)。

假设激光输出的初始光强为 I_0'' , 通过实验池传输后探测器测量到的透射后的光强是 I_1'' (未充入雾的时候), 充入一定的雾之后探测器测量到的是 I_2'' , 则:

$$I_1'' = aI_0'' \exp(-\gamma_0 l) \quad (10)$$

$$I_2'' = aI_0'' \exp(-\gamma_1 l) = aI_0'' \exp[-(\gamma_0 + \gamma)l] \quad (11)$$

式中, l 为光传输距离, a 代表直角棱镜和实验池两端镜面带来的损耗系数, $\gamma, \gamma_0, \gamma_1$ 分别代表实验池中雾浓度、大气、混合气体的消光系数。先测得 I_1'' 和 I_2'' , 把上两式相除便可得到:

$$I_2'' = I_1'' \exp(-\gamma l) \quad (12)$$

根据上式和测得数据便可以计算出不同的雾浓度下不同的消光系数 γ 。

利用温湿度计测得室内相对湿度, 代入(9)式得到空气中水蒸气密度, 功率计测得的 I_1'', I_2'' 代入(12)式可算出衰减系数(消光系数)^[9]。

由图 3 可以看出, 蓝光的衰减系数要比红光大, 并

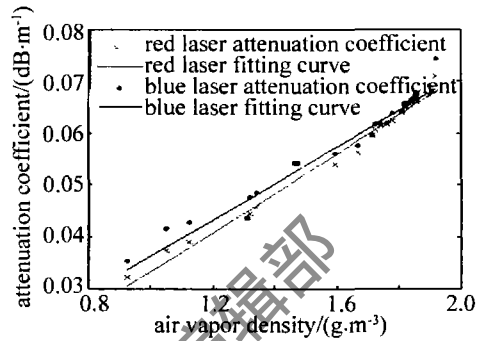


Fig. 3 The relationship of attenuation coefficient and air vapor density

且当雾气浓度达到一定时两者趋于一致, 这和理论也是相一致的。在能见度较大、雾气浓度较低时, 大气传输满足单次散射模型, 散射系数与波长有关。而当能见度较小时, 多径散射占据主要作用时, 散射后的衰减系数与激光波长无关。拟合后的曲线近似满足正比关系, 根据(3)式, 可以通过拟合后的斜率算出 $a_e \approx 3\mu\text{m}$, 利用这种算法也可估算雾滴的有效平均半径。

2.2 粉尘实验与结果分析

研究粉尘遮蔽能力的有效途径是测量或计算粉尘的消光能力, 透射率则是测量消光能力时的必测参量之一。实验在图 1 所示的实验池内进行, 实验中通过燃烧香烟和普通木材产生粉尘微粒, 粉尘浓度由粉尘测试仪测出。

在温度 $20.8^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$, 湿度 $25\% \pm 2\%$ 时, 进行了实验, 数据曲线拟合得到图 4, 蓝光曲线方程为

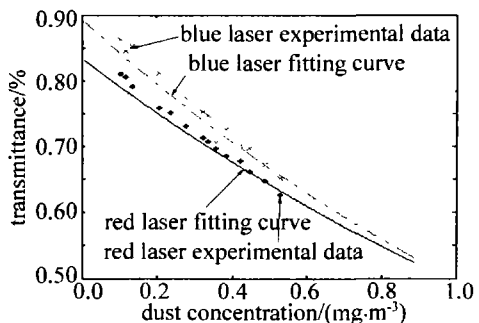


Fig. 4 The relationship of transmittance and dust concentration after cigarette combustion

$y = 0.848e^{-0.539x}$, 红光曲线方程为 $y = 0.895e^{-0.541x}$ 。拟合指数曲线证明了应用比尔-郎伯定律计算粉尘对激光的消光(衰减)系数是有效的, 测量方法也是合理的。烟尘的实验再次证明了雾气实验的结论: 波长越

大,散射系数越大,当浓度达到一定程度后与波长没有关系。

木材燃烧的测量数据拟合曲线得到图5。利用木

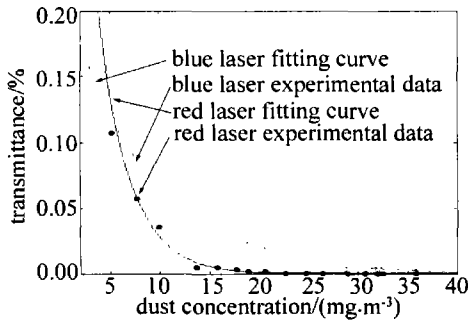


Fig. 5 The relationship of transmittance and dust concentration after wood combustion

材燃烧产生的粉尘进行实验所得到蓝光拟合曲线方程为 $y = 0.731e^{-0.328x}$, 红光拟合曲线方程 $y = 0.1808e^{-0.103x}$ 。从图中可看出,木材燃烧的粉尘浓度要比香烟大,透射率较低,这也说明了木材燃烧的颗粒要比香烟颗粒大,在实际中会严重影响光通信效果。并且实验结果随粒子浓度增大,并没有满足波长越大,散射系数越大结论。这是由于当光波长远小于散射微粒尺寸时,产生几何散射,几何散射衰减系数与激光波长无关,也称非选择性散射。

不同发烟剂的拟合曲线方程可以看出,其透射率衰减速度有所不同。粉尘浓度越大,透射率愈小,最后终为0。这是因为不同发烟剂的材料和配比不同,其粉尘生成率不同,以及生成的气体成分、微粒大小和分布等的差异,最终反映的衰减性能也不尽相同。

3 结论

在对随机大气信道散射效应分析的基础上,建立双波长实验系统,用模拟大气环境的方法,研究了雾和烟尘对激光传输影响。重点对典型单一天气条件下(如云雾、粉尘)的大气衰减进行测量,研究了雾气浓

度对光功率的影响以及与光波长的关系;粉尘浓度对透射率的影响以及与光波长的关系。通过对所测数据的拟合分析得出空气水蒸气密度与衰减系数的线性关系;粉尘浓度与透射率的指数关系。所得结论与比尔朗伯定律相一致。双波长同时、同信道传输实验较单一波长实验更能反映大气影响与光波长的关系。在实验池中,通入不同种类的气体 and 粉尘,就可以研究大气信道中某一物质对光束影响规律。实验结果和实验方法对深入研究大气对光传输的影响具有重要意义,对大气参量测量、遥感图像处理等也具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] LI Y Q, ZHU Y, WANG J P. Optical communication principle and technology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 309-336 (in Chinese).
- [2] SHEIKH S, KOHLSDORFER P, LEITGEB E. Channel modeling for terrestrial free space optical links [C]//Transparent Optical Networks, 2005, Proceedings of 2005 7th International Conference. Austria: IEEE, 2005: 407-410.
- [3] YUAN Z H, ZHANG J, ZHANG W T. Experimental study on transmission characteristics of dual wavelength laser in atmospheric turbulence [J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 686-690 (in Chinese).
- [4] YANG Y, ZHANG ZH X, JIANG D Z. Laser techniques of measuring particles size and their size distribution [J]. Laser Technology, 1997, 21(2): 122-127 (in Chinese).
- [5] WU J, YANG C P, LIU J B. The theory of optical transmission in atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 39-42 (in Chinese).
- [6] BRUCE D. Experimentally determined relationship between extinction coefficient and liquid water content [J]. Appl Opt, 1980, 19(19): 3355-3360.
- [7] XIAO S R, GAO Z S, LIAO Y B. Application of gas sensor based on rectangular prism in the monitoring of atmospheric visibility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 81-84 (in Chinese).
- [8] STRIEKLNAD B R, LAVAN M J, WOODBRIDGE E, et al. Effects of fog on the bit-error rate of a free-space laser communication system [J]. Appl Opt, 1999, 38(3): 424-431.
- [9] CHENG Y B, SUN X Q, ZHAO M H. Analysis of the signal detection of laser scattering in the air [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 277-279 (in Chinese).

(上接第465页)

- [4] YAN L H, CHI F T, JIANG X D, et al. Preparation of hydro-oleophobic silica antireflective coating [J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(6): 1247-1250 (in Chinese).
- [5] XIAO B, ZENG J F, CAO C R, et al. Preparation and characterization of polyoxidepropylene modified SiO₂ antireflective film [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2008, 24(3): 491-494 (in Chinese).
- [6] CAO C R, NAN F, CHEN N, et al. Preparation and characterization of polyvinyl butyral doped organic-inorganic hybrid silica antireflective coatings [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2008, 24(7): 1104-1107 (in Chinese).
- [7] XU Y, WU D, SUN Y H, et al. Comparative study on hydrophobic antireflective films from three kinds of methyl-modified silica sols [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, 351: 258-266.
- [8] MA J H, WU G M, CHENG Y B, et al. Preparation of hydrophobic optical silica thin film with sol-gel method [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2001, 17(12): 1112-1116 (in Chinese).
- [9] WANG J, ZHANG C R, FENG J, et al. Preparation and infrared spectral analysis of nanoporous silica thin film [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(7): 1045-1048 (in Chinese).
- [10] JIANG H M, ZHENG Z, WANG X L. Kinetic study of methyltriethoxysilane (MTES) hydrolysis by FTIR spectroscopy under different temperatures and solvents [J]. Vibrational Spectroscopy, 2008, 46(1): 1-7.
- [11] ZHANG Q Y, WANG J, WU G, et al. Interference coating by hydrophobic aerogel-like SiO₂ thin films [J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 72(1): 56-59.