

The Research of the Correlation Between Atmospheric Refractivity and Extinction Index in Ship-to-ship Laser Communication

xichuang Ren¹, jiang-an Wang², ronghua Wu³

Academy of Electronic Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China
e-mail rxcxxx@163.com

Abstract: Laser based free-space-optical communication (FSOC) is known to provide covert, secure, jam-proof and very high bandwidth performances. FSOC will be the main mode for naval ship-to-ship communication. Extinction index and atmospheric refractivity reflect the laser's transmission effects from different aspects in atmosphere laser communication system. The atmosphere transmission extinction index of 1.06 micron laser is measured in backscatter visibility measuring set, and the temperature, the humidity and the atmosphere pressure are measured simultaneously to calculate the atmosphere refractivity. The research of correlation between refractivity and extinction index in atmosphere laser communication is made in simulation and experimental data, the conclusion indicates that extinction index and atmospheric refractivity dependent have obvious correlation, this could been used in tropospheric laser communication.

Keywords: laser; refractivity; extinction index

舰载通信中大气折射率与消光系数相关性研究

任席闯, 王江安, 吴荣华

海军工程大学电子工程学院, 武汉, 430033
E-mail rxcxxx@163.com

【摘要】无线激光通信具有容量大、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强、保密性高、功率消耗小等主要优点,是未来船舶间通信的发展趋势。激光大气通信系统中,消光系数和折射率分别从不同的侧面表征激光的传输效果。本文采用后向散射式能见度测量仪对1.06微米波长激光大气传输的消光系数进行测量,并同步测量温度、湿度和大气压强来测量大气折射率,用实验数据和仿真研究激光传输消光系数与大气折射率之间的相关性,结论表明二者之间有明显的相关性,可为对流层激光大气通信提供参考。

【关键词】激光; 折射率; 消光系数

1 引言

大气气体分子及气溶胶的吸收和散射会引起光束能量衰减^[1],消光系数反映了光能量的衰减情况;而大气折射率影响激光的传输路径,其不均匀性会引起光波的振幅和相位起伏。光学湍流就是由大气湍流引起的折射率起伏,可以造成光束的漂移和扩展以及图像的抖动和模糊^[2]。

本文采用后向散射式能见度测量仪对1.06微米波长激光大气传输的消光系数进行测量,并同步测量温度、湿度和大气压强来测量大气折射率,研究激光传输消光系数与大气折射率之间的相关性,为对流层激光大气通信提供参考。

2 大气折射率与激光传输消光系数的相关性理论

激光在大气中传输的能量衰减主要是由散射引起的,可分为大气分子散射(瑞利散射)和悬浮粒子的散射(米氏散射)。对于可见光和红外波段,分子散射的作用可以忽略,即认为衰减主要是由粒子散射造成的,根据Mie散射理论可以计算消光效率因子

$$Q_{\text{ext}}(\alpha, m) = \frac{2}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n + b_n)] \quad (1)$$

式(1)中 a_n 、 b_n 是由里卡蒂-贝塞尔

(Riccati-Bessel) 函数决定的复数, 是粒子尺度参数 $\alpha = 2\pi r / \lambda$ 和相对折射率 m 的函数, r 为粒子半径, λ 为入射光波长。

米散理论虽然采用严格的电磁理论推导, 但是计算复杂, 对米散效率因子的计算通常采用近似算法, 最常用的有 Van de Hulst 散射近似^[4]和瑞利散射近似两种。Van de Hulst 在 1957 年采用“变则衍射”方法对相对折射率 $|m| \approx 1$ 时的球形粒子作了散射近似, 结果表明: 直到 $|m| \approx 2$ 仍然是很好的近似方法。Van de Hulst 近似的计算比较简单, 得到的散射效率因子的一种简化模型为

$$Q = 2 - \frac{4}{\rho} \sin \rho + \frac{4}{\rho^2} (1 - \cos \rho) \quad (2)$$

式中 $\rho = 2\alpha(m-1)$, 称为归一化尺度参数。若已知粒子尺度谱分布 $n(r)$, 则可以计算群体粒子的消光系数:

$$\sigma_{ex} = \int_{x_1}^{x_2} Q \pi r^2 n(r) dr \quad (3)$$

由于是 $\alpha = 2\pi r / \lambda$ 和相对折射率 m 的函数, 由 (2)、(3) 式可以观察出, 散射的消光系数与相对折射率 m 、粒子半径 r 、入射光波长 λ 和粒子尺度谱分布 $n(r)$ 相关。当前采用的气溶胶粒子尺度谱分布模型主要有 Deirmendjian 指数谱分布模型和 Junge 的幂指数律谱分布模型^[5], 本文采用 Junge 指数谱分布模型进行计算, 其计算式为

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = 0.434cr^{-(\nu+1)} \quad (4)$$

本文为了研究大气折射率与激光大气传输消光系数的相关性, 假定气溶胶的分布服从夏季大陆性气溶胶的典型分布, 并认为气溶胶粒子半径分布在 $0.01-2 \mu m$, 为了保持气溶胶性质稳定, 均选取晴朗天气进行研究。

利用 Van de Hulst 散射近似算法, 可以很方便的得出消光效率因子和相对折射率关系, 图 1 是在不同的粒子尺度情况下 MATLAB 仿真的消光效率因子和相对折射率关系波形, 波形可以看出消光效率因子 Q 值随相对折射率变化起伏, 最终趋于 $Q=2$ 。

表 1. 能见度仪器参数

Table 1. The principal technical indicators of laser remote sensing tester

能见度测量范围: 50~20000m		精确度: $\pm 15\%$	重量 2.8Kg
工作环境: 温度 -50~+50℃		湿度 0-100%	水平旋转 0~360°
激光器 Laser		接收光学系统 Receiving optics	
工作波长:	1064nm	口径:	48 mm
脉冲能量:	11mj	视场:	7°
光束发散角:	1m rad	滤光镜中心波长:	1064 nm
脉冲宽度:	10 ns	滤光镜透过率:	88%

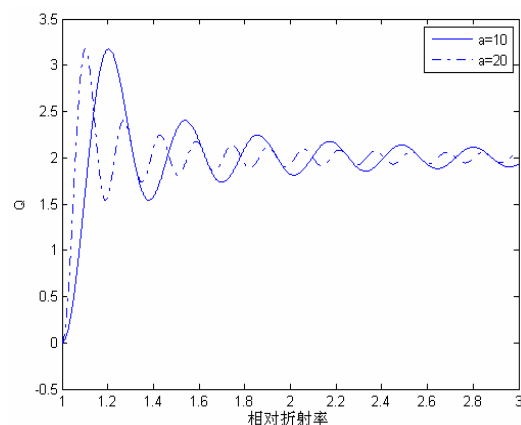


图 1. 消光效率因子与相对折射率关系曲线

Figure 1. The relationship between extinction efficiency factor and relative refractivity

2 试验方法

为了研究激光在大气中传输的消光系数与大气折射率的相关性, 利用后向散射式能见度测量仪测量 1.06 微米波长激光的消光系数, 并同步测量温度、湿度和大气压强, 来获得消光系数和折射率的真实数据。测量时认为大气水平均匀, 测量水平方向上激光回波能量分析消光系数, 并在同一水平高度测量温度、湿度和大气压强来测量大气折射率, 同步测量的时间为每 30 分钟测量一次。

2.1 消光系数测量

激光后向散射式能见度测量仪接收到的是激光回波的幅度, 通过计算回波信号的衰减来计算大气的衰减系数, 从而计算大气能见度。仪器由脉冲激光器、

接收望远镜和信号检测控制处理系统三个基本组成部分构成。仪器的主要技术指标如表 1 所示：



图 2. 能见度测试仪器

Figure 2. The photo of laser remote sensing tester

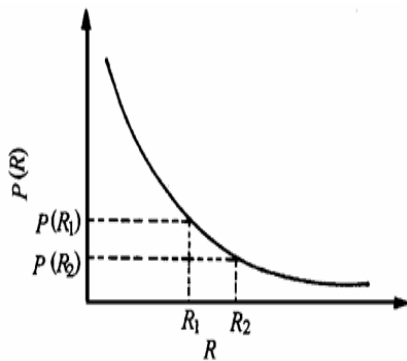


图 3. 激光回波信号幅度 $P(R)$ 随 R 的变化关系

Figure 3. Relationship between laser backscatter signal amplitude $p(R)$ and distance R

一个激光脉冲内激光回波的幅度 $P(R)$ 随距离 R 的变化曲线如图 (3) 所示。若 R_1 、 R_2 是 $P(R) \sim R$ 图中靠的较近的两点，则根据激光雷达方程可得：

$$P(R_1) = \frac{CE\beta(R_1)}{R_1^2} \cdot e^{-2\int_0^{R_1} \sigma(R) dR} \quad (5)$$

$$P(R_2) = \frac{CE\beta(R_2)}{R_2^2} \cdot e^{-2\int_0^{R_2} \sigma(R) dR} \quad (6)$$

其中， C —激光雷达系统常数； β —大气后向散射系数； σ —消光系数； E —激光系统常数，它由激光发射功率，激光脉冲宽度，望远镜的有效接收面积共同决定。

最终可以推导出消光系数：

$$\sigma = -\frac{1}{2(R_1 - R_2)} \ln \frac{P(R_1)R_1^2}{P(R_2)R_2^2} \quad (7)$$

2.2 大气折射率测量

在研究电磁波的传输时定义折射指数 $N = (n-1) \times 10^6$ ，可见光与近红外波段大气折射指数由下式确定：可见光与近红外波段 ($0.36 \sim 3 \mu m$) 大气折射率由下式确定：

$$N = (n-1) \times 10^6 = m_1(\lambda) \frac{P}{T} + m_2(\lambda) \frac{e}{T}, \quad (8)$$

P 为气压 (hPa)； e 为水汽压 (hPa)； T 为绝对温度 (K)； $m_1(\lambda)$ 、 $m_2(\lambda)$ 分别为波长 λ (μm) 的函数，分别由以下两式确定^[6]：

$$m_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{683.937}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{45.473}{38.9 - \lambda^{-2}} \quad (9)$$

$$m_2(\lambda) = 64.8731 + 0.5808\lambda^{-2} - 0.0071150\lambda^{-4} + 0.0008851\lambda^{-6} \quad (10)$$

测量得到的湿度是相对湿度，由于相对湿度 rh 是 P_{h2o} 与饱和蒸汽压 $E_s(T)$ 之比，因此要进行换算

$$rh = \left[\frac{P_{h2o}}{E_s(T)} \right] \times 100\% \quad (11)$$

其中饱和蒸汽压用下式计算^[7]

$$E_s(T) = 2.4096 \left(\frac{300}{T} \right)^5 10^{(10-2590.2/T)} \quad (12)$$

通过测量温度、湿度和大气压强计算激光通过对流层传输的大气折射率。

3 数据及分析

3.1 消光效率因子和大气折射率关系

对于波长为 $1.06 \mu m$ 的激光在对流层大气中的传输，其损耗主要是由气溶胶粒子的散射造成的，可以用气溶胶粒子的散射效果来计算激光在大气中传输的消光系数。对具有不同尺度的气溶胶粒子散射效果，用线性平均半径 $\bar{r}$ 来替代不同尺度粒子的总体散射效果，见式 (13)

$$\bar{r} = \frac{\int_0^\infty rn(r) dr}{\int_0^\infty n(r) dr} \quad (13)$$

(3) 式可以演变为

$$\sigma_{ex} = Q \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) dr \quad (14)$$

在气溶胶平均半径和浓度一定的情况下, 激光传输的消光系数与消光效率因子成线性关系, 因此在理论上计算折射率与消光效率因子的相关性来代替折射率与消光系数的相关性。

米散理论中, 相对折射率 m 是散射粒子相对于其周围介质的折射率比, 对于气溶胶而言, 也就是气溶胶粒子折射率和大气折射率的比值, $m = \frac{m_1}{m_0}$, 其中 m_1 为气溶胶粒子的折射率, 一般在 1.5 左右^[8,9], 本文分析取定值 $m_1 = 1.5$; m_0 为大气的折射率, 用实际测量的温、湿、压计算得到。图 4 是气溶胶粒子折射率取定值 $m_1 = 1.5$ 条件下用 MATLAB 仿真的大气折射率与消光效率因子的关系。

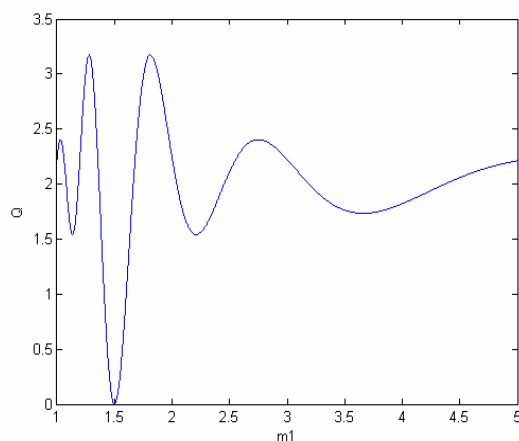


图 4 消光效率因子与大气折射率关系仿真曲线

Figure 4. The simulation relationship between extinction efficiency factor and atmosphere refractivity

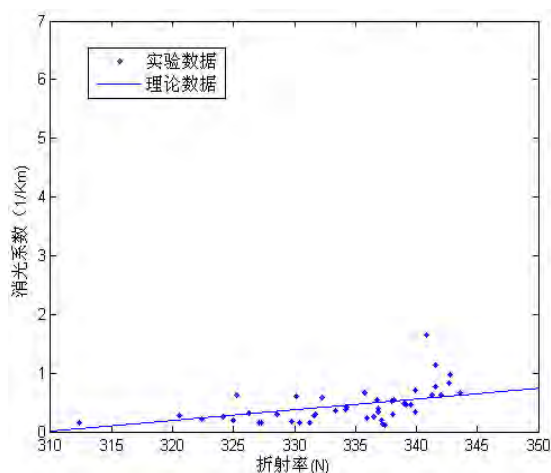


图 5. 实测大气折射率与消光系数曲线

Figure 5. The actual measurement relationship between extinction index and atmosphere refractivity

3.2 实测数据

本文利用的 2006 年 5 月晴朗气象条件下在孝感空军气象台每 30 分钟同步记录的数据对大气折射率与消光系数的相关性进行分析, 结果如图 5 所示, 结果与理论值基本相符, 但有误差, 总体误差小于 30%, 分析误差产生的原因: 1 尽管测量天气条件均为晴朗天气, 但温度、湿度不同, 气溶胶粒子吸附水汽的比例也发生变化, 因此造成气溶胶粒子的折射率有了相应的改变, 与事先假定的气溶胶粒子的折射率为定值有误差; 2 对气溶胶粒子尺度取平均用米散理论进行计算, 未考虑大尺度粒子多次散射的影响。

4 结论及误差分析

本文基于米散理论用 MATLAB 对 1.06 微米波长激光在对流层中传输的消光系数和大气折射率作了仿真分析, 并用后向散射式能见度测量仪测量消光系数, 同步测量温、湿、压的方法来测量大气折射率来进行实验验证, 结论表明二者之间有明显的相关性, 因此可能在已知一个量的条件下对另外一个量进行估计, 为激光通信的效果进行评估。

References(参考文献)

- [1] YANG Rui-ke, MA Chun-lin, HAN Xian-ge, SU Zhen-ling, JIAN Dian-jun, Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere[J]. INFRARED AND LASER ENGINEERING. 2007, 36:415-418 杨瑞科, 马春林, 韩香娥等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36:415-418.
- [2] Zhang Wen-tao, Zhu Bao-hua, The Analysis and Research for the Laser Beam Through Onflow Atmosphere Channel[J]. Journal of the University of Electronic Science and Technology of China. 2007, 36(4): 784-787. 张文涛, 朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 784-787.
- [3] van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957. 127~129.
- [4] Wu Jian, Yang Chun-pin, Liu Jian-bin. Optical propagation theory in atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 24-27.
- [5] Mcconnety E. J., Optics of the atmosphere : scattering by molecules and particles [M]. New York : Wiley, 1976
- [6] M. E. Thomas and D. D. Duncan, "Atmospheric transmission", The Infrared Electro-optical Systems Handbook, Vol. 2, Atmospheric propagation of radiation, F. G. Smith Ed., SPIE Press, 1993, pp. 1-156.
- [7] H. J. Liebe, "A contribution to modeling atmospheric millimeter-wave properties", Frequenz 41, 31-36 (1987).

- [8] Yan fengqi, Hu H.L,Measurements of Number Density Distribution and Imaginary Part of Refractive Index of Aerosol Particles[J].Acta optical sinica. 2003, 23(7):855-859. 阎逢旗, 胡欢陵, 周军等. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量[J].光学学报, 2003, 23(7):855-859.
- [9] Li xuebin,Hu xunxin. Characteristics measurement of extinction and refractive index of aerosol particles[J]. High Power Laser and Particle Beams,2007, 19(2);207-210. 李学彬, 胡顺星, 徐青山, 胡欢陵. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量[J].强激光与粒子束,2007, 19(2);207-210.
- [10] Olga V. Kalashnikova and Heinz A. Willebrand. Free-space optics system operation in Asian cities under heavy dust loading