

大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究

韩 成^{1,2} 白宝兴¹ 杨华民^{1,2} 佟首峰² 范静涛^{1,2} 陈纯毅^{1,2} 于林韬²

(¹ 长春理工大学计算机学院, 吉林 长春 130022;
² 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 分析了大气散射和吸收特性,并进一步研究了大气散射所引起的激光脉冲延迟效应,定量分析了在不同能见度、不同脉冲传输距离、不同散射系数和单程散射反照率的条件下,大气信道所产生激光脉冲传输延迟时间,为探测误差的校正提供了理论依据。通过对仿真结果的分析可知,在衰减系数不变的条件下,大气信道的散射越严重,散射所造成的路径延迟就越大,激光脉冲传输延迟时间也就越长;而大气的吸收效应越明显,激光脉冲传输延迟时间越短。

关键词 大气光学; 脉冲延迟时间; 大气散射; 大气吸收; 多径色散; 能见度

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2046

Study and Simulation of Air Influences on Laser Pulse Transmission Delay Time

Han Cheng^{1,2} Bai Baoxing¹ Yang Huamin^{1,2} Tong Shoufeng² Fan Jingtao^{1,2}
Chen Chunyi^{1,2} Yu Lintao²

¹ School of Computer Science & Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

² Key Laboratory of Technology of Photo-Electronic Measure-Control and Laser Transfers, Ministry of Education,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The characteristics of air scattering and absorption are analyzed, and laser pulse delay time domino effect caused by air scattering is studied. Laser pulse transmission delay time caused the air channel, on the conditions of different visibilities, different transmission distances, different scattering coefficients and one way scattering albedo, is quantitatively analyzed. It can provide theory basis for emendation of detection error. The simulation result show that the path delay caused air scattering is greater and laser pulse transmission delay time is longer, when the air channel scattering is more severe and air scattering coefficient is not changed. while the air absorption is more obvious, the laser pulse transmission delay time is less.

Key words atmospheric optics; pulse delay time; air scattering; air absorption; multipath dispersion; visibility

1 引 言

光波在大气层传播的过程中,大气层的散射会引起与光纤中模式色散相似的多径色散,这种多径色散使光波的波形发生畸变,而这种畸变对窄光学脉冲的影响相对而言要更严重一些。在无线激光通

信系统中,光源发射光脉冲后,散射路径上的光脉冲相对于直接路径上的光脉冲延时到达接收端,并合并成一个比发射的光脉冲更加宽的光学脉冲,这一效应可视为多径色散^[1]。光束在穿过大气信道的过程中,粒子对光束的影响作用与粒子大小(相对于波

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-11-25

作者简介: 韩 成(1978—),男,博士研究生,主要从事自由空间激光通信总控系统和系统仿真等方面的研究。

E-mail: hancheng0626@hotmail.com

导师简介: 白宝兴(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事无损检测与在线检测技术等方面的研究。

E-mail: bxbai@cust.edu.cn

长的断面尺寸)和粒子密度(粒子的体积浓度)关系很大。低密度大尺度粒子趋于服从一次散射理论,它主要产生衰减作用,高密度小粒子服从多次散射理论,除衰减作用外,还产生光束散射和光波传播过程中波前的随机相位漂移作用^[2~5]。

在无线光通信系统中,光信号可能要经过的信道主要有大气、云层和海水。由于云层和海水的衰减系数要比空气的衰减系数大 2~3 个数量级^[6],所以人们首先定量研究这两种信道所引起的激光脉冲传输延迟效应并通过试验得到了一些经验公式^[7~9]。对于无线激光通信系统,一般要求高传输速率和低误码率。通信速率一般为每秒钟上百兆比特,甚至更高,这就使得每一个脉冲信号的上升沿和下降沿之间的时间间隔仅为几个纳秒或更小,在这种情况下,大气信道所引起的脉冲传输延迟效应对这个窄脉冲信号的影响非常严重,它直接影响接收端信号的同步时钟提取的质量,进而导致误码率的增加。随着无线光通信技术的发展,对于无线光通信系统的研究已经到了野外实验阶段,大气信道所引起的脉冲传输延迟时间严重影响了通信误码率。为了达到高传输速率和低误码率的要求,需要采用有效的方法来衡量脉冲传输延迟效应,为减小探测误差提供依据。

2 大气衰减模型的理论分析

光波在大气中传播时,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,衰减的能量部分被吸收而转变为其它形式的能量(如热能等);部分被散射而偏离原来的传播方向(即辐射方向重新分配)。吸收和散射的总效果是使传输的光辐射强度衰减,这就是所谓的大气衰减。

大气的散射是由大气中不同大小的颗粒的反射或折射所造成的,这些颗粒包括组成大气的气体分子、灰尘和水滴等。纯散射没有能量的损失,它只是改变了能量的分配方向。大气对光束的散射可分为分子散射和粒子散射。在近地面大气层中,分子散射的影响是很小的,造成光能量衰减的主要是悬浮粒子的散射。大气的吸收表现为当光波通过大气时,大气分子在光波电场作用下产生极化,并依入射光的频率作受迫振动,而光波为了克服大气分子内部阻尼力要消耗一部分能量,这个能量的一部分转化为其他形势的能量。当入射光的频率等于大气分子的固有频率时,发生共振吸收,吸收出现极大值。因此分子的吸收特性强烈的依赖于光波的频率。

由于大气的不确定性,大气衰减系数在不同的天气下的变化范围很大,近地面大气层中,造成光能量衰减的主要是悬浮粒子的散射,即米氏散射。由于米氏散射的公式不易进行计算并且输入量数据不易测量,所以一般可以使用一个与能见度有关的经验公式来表示大气衰减系数,大气衰减系数 c 与能见度 v 的关系式表示为

$$c = \frac{3192}{v} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q}, \quad (1)$$

式中 v 为能见度,单位为 m, λ 为光波波长,单位为 nm, λ_0 为 550 nm, q 为与能见度有关的参数,较传统的观点认为它们之间的关系如下^[10]

$$q = \begin{cases} 1.6, & v > 50000 \text{ m} \\ 1.3, & 6000 \text{ m} < v \leq 50000 \text{ m} \\ 0.00016v + 0.34, & 1000 \text{ m} < v \leq 6000 \text{ m} \\ (v - 500)/1000, & 500 \text{ m} < v \leq 1000 \text{ m} \\ 0. & v \leq 500 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

3 激光脉冲传输延迟效应的理论分析

大气衰减效应包括大气散射效应和大气吸收效应,无线激光通信系统中的发射子系统发射的光波被大气中的粒子散射而重新定向,其中部分路径最终被散射到接收机,由此可知,激光脉冲传输延迟效应主要是由大气信道的散射效应所引起的,而大气散射效应主要是大气层中的气溶胶所引起的。在保证大气衰减效应不变的条件下,散射越严重,散射所造成的路径延迟就越大,激光脉冲传输延迟时间也就越大;大气的吸收效应越明显,路径对散射传播的损耗越大,这使得散射在脉冲的综合形成中越不重要,所以吸收效应使脉冲延迟时间仅限制在离直接路径相对较小的散射角内的路径上。文献[7]将经典电子散射理论运用到光子散射研究中去,分析了海水散射效应引起的水下激光脉冲传输延迟效应,并采用小角度近似处理方法,推导出了传输延迟时间表达式

$$\Delta T = \frac{zn}{C} \times \left\{ \frac{8}{27\omega_0\tau \int_0^\pi \gamma_0^2 P(\gamma_0) d\gamma_0} \left[\left(1 + \frac{9}{4}\omega_0\tau \int_0^\pi \gamma_0^2 P(\gamma_0) d\gamma_0 \right)^{3/2} - 1 \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

式中 z 为脉冲传输距离,单位为 m, C 为光速,单位为 m/s, n 为传输介质的折射率, $\omega_0 = b/c$ 为传输介质单程散射反照率, c 为衰减系数, b 为散射系数,

$\tau = b \times z$ 是传输介质中 z 范围内所包含的标准散射长度的个数,也就是光子与传输介质中粒子相互作用的次数,进而可以用 $\omega_0 \tau$ 描述在深度 z 范围内光子被粒子散射的次数。 γ_0 是光子与粒子单次碰撞时的散射角, $P(\gamma_0)$ 为粒子标量散射相位函数,实际应用中,一般都是通过实验测定各个散射方向上的散射光强度,然后拟合经验公式,对于大粒子的散射情况,有如下经验公式^[11]

$$P(\gamma_0) = (2b\eta/\gamma_0) \exp(-\eta\gamma_0), (\eta \approx 10) \quad (4)$$

对于厚云层(光学厚度大于 10),云层引起的传输延迟时间可以表现为^[12]

$$\Delta T = \frac{zn}{C} \times \left\{ \frac{8}{27\omega_0 \tau_{\text{opt}} \theta^2} \left[\left(1 + \frac{9}{4} \omega_0 \tau_{\text{opt}} \theta^2 \right)^{1.5} - 1 \right] - 1 \right\}, \quad (5)$$

式中 τ_{opt} 为光学厚度, θ 为粒子标量相位函数的均方散射角,其他参数与(4)式含义一样。

4 仿真结果与分析

尽管大气、云层、海水等信道各有不同的特点,但都属于光波在离散或连续随机介质中传播的范畴,所以可以根据云层和海水信道的数学模型和大气信道的特点分析大气信道引起的脉冲延迟效应。根据(3)式和(4)式,在衰减系数为 $5.81 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$,

表 1 国际能见度等级表

Table 1 International visibility rank

Rank	Weather	Visibility/m	Rank	Weather	Visibility/km
0	fog	<50	5	haze	2~4
1	thick fog	50~200	6	light haze	4~10
2	middle fog	200~500	7	clearness	10~20
3	light fog	500~1000	8	very clearness	20~500
4	weak fog	1000~2000	9	best clearness	>50

根据(1)式,可以得到不同波长条件下,大气能见度与大气衰减系数之间的关系如图 2 所示,其中

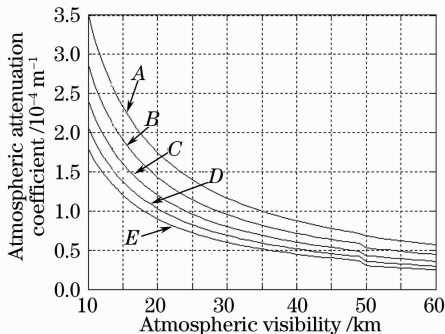


图 2 大气衰减系数与大气能见度的关系

Fig. 2 Relation between atmospheric attenuation coefficient and visibility

单程散射反照率: A 为 1.0, B 为 0.9, C 为 0.8, D 为 0.7, E 为 0.6, F 为 0.5 的情况下,大气信道引起的激光脉冲传输延迟时间与传输距离之间的关系如图 1 所示,从图中可以看出,大气信道所引起的脉冲传输延迟时间是在纳秒量级上并且随着传输距离和单程散射反照率的增加而增加,单程散射反照率越大,单位距离所引起的脉冲传输延迟时间越大。

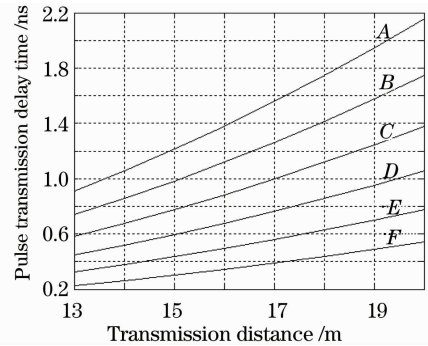


图 1 激光脉冲传输延迟时间与传输距离之间的关系
Fig. 1 Relation between laser pulse transmission delay time and transmission distance

“能见度”是大气对可见光衰减作用的一种度量,在白天是指以水平天空为背景下人眼能看得见的最远距离,在夜间指能看见中等强度的未聚焦光源的距离。气象学把能见度分为十个等级^[10]如表 1 所示。

激光波长: A 为 $0.6 \mu\text{m}$, B 为 $0.7 \mu\text{m}$, C 为 $0.8 \mu\text{m}$, D 为 $0.9 \mu\text{m}$, E 为 $1.0 \mu\text{m}$ 。从图 2 可以看出,大气衰减系数随着能见度的增加而减小,随激光波长的增加而减小。

综合(1)~(4)式,可以得到大气激光脉冲延迟时间与大气能见度和脉冲传输距离之间的关系如图 3~5 所示。从图 3 可以看出在单程散射反照率为 0.7,激光波长为 $0.8 \mu\text{m}$,传输距离在 13~20 km 之间,大气能见度在 10~60 km 之间的条件下,大气所引起脉冲传输延迟时间最大不超过 3 ns 并随着大气能见度的增加而减小,随着传输距离的增加而增加。

图 4 反映了在单程散射反照率为 0.7,激光波

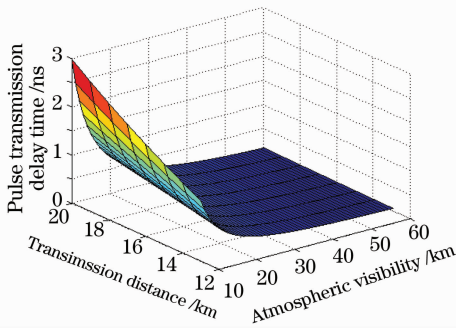


图 3 脉冲延迟时间与大气能见度和脉冲传输距离之间的关系

Fig. 3 Relation among pulse transmission delay time, atmospheric visibility and transmission distance

长为 $0.8 \mu\text{m}$, 脉冲传输距离 A 为 20 km , B 为 18 km , C 为 15 km , D 为 13 km 的情况下, 大气激光脉冲延迟时间与大气能见度的关系; 从图 4 可以看出, 随着传输距离的增加, 单位大气能见度对于脉冲传输延迟时间的影响越明显, 在传输距离为 20 km 的条件下, 能见度从 20 km 减小到 10 km 时, 大气所引起的脉冲传输延迟时间增加了一倍多。

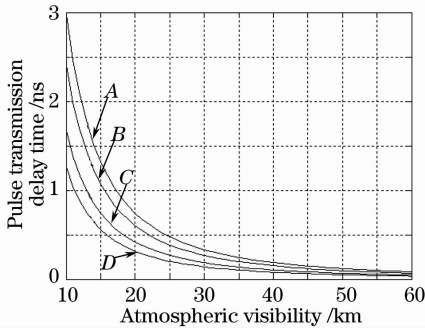


图 4 脉冲传输延迟时间与大气能见度间的关系

Fig. 4 Relation impulse transmission delay time and atmospheric visibility

图 5 反映了在单程散射反照率为 0.7 , 激光波长为 $0.8 \mu\text{m}$, 能见度 A 为轻霾(能见度为 10 km),

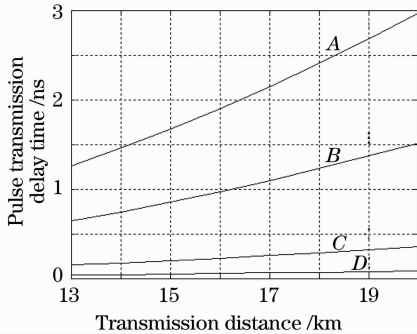


图 5 脉冲传输延迟时间与脉冲传输距离的关系

Fig. 5 Relation of pulse transmission delay time and transmission distance

B 为晴朗(能见度为 15 km), C 为很晴朗(能见度为 40 km), D 为极晴朗(能见度为 60 km) 的情况下, 大气激光脉冲延迟时间与脉冲传输距离的关系。从图 5 可以看出, 随着大气能见度的减小, 单位传输距离对于脉冲传输延迟时间的影响越明显, 在大气能见度为 10 km 的条件下, 激光脉冲传输距离从 13 km 增加到 20 km 时, 大气所引起的脉冲传输延迟时间增加了一倍多。

5 结 论

通过与文献[8]和文献[9]比较可知, 大气信道所引起的脉冲传输延迟效应比海水和云层小, 对低速无线光通信影响不大, 目前对大气所引起的脉冲传输延迟效应的研究不够深入, 但随着无线光通信技术的发展, 提出了传输速率大于 300 Mb/s 的要求, 通过实验发现, 在传输数率很高的情况下, 大气信道产生的脉冲传输延迟时间已经严重影响了通信误码率。通过仿真分析, 得到在能见度为 10 km , 单程散射反照率为 0.7 , 激光波长为 $0.8 \mu\text{m}$ 的情况下, 大气所引起的脉冲传输延迟时间约为 1.2 ns 。而传输速率为 300 Mb/s 时, 一个脉冲时间仅约为 3 ns , 这时脉冲延迟时间将严重影响提取同步时钟的质量, 从而导致误码率增大, 影响通信性能。

参 考 文 献

- Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1166~1172
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1166~1172
- Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 898~902
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 898~902
- Gao Chong, Ma Jing, Tan Liying et al.. Time-averaging effects for atmospheric scintillation in atmospheric optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 481~486
高 宠, 马 晶, 谭立英等. 大气光通信中大气闪烁时间平滑效应研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 481~486
- Huang Honghua, Yao Yongbang, Rao Ruizhong. Atmospheric turbulence outer scale measurement based on an gle-of-arrival covariance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1361~1365
黄宏华, 姚永帮, 饶瑞中. 根据到达角协方差测量大气湍流外尺度[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1361~1365
- Ji Xiaoling, Zhang Tao, Chen Xiaowen et al.. Spectral properties of flat-topped beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 12~16
季小玲, 张 涛, 陈晓文等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 12~16
- N. G. Jerlov, *Marine Optics* [M]. New York, 1976
- He Xishun, Zhu Xiao, Tan Xuesong et al.. Research on the

- transmission delay of laser pulse caused by the sea water scattering effect[J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(1):19~21
- 贺细顺, 朱 晓, 谭雪松等. 海水散射引起激光脉冲传输延迟的研究[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(1): 19~21
- 8 Zhen Jie , Liu Weiting. Study on cloud characteristics in blue-green laser down propagation channel [J]. *J. East China Shipbuilding Institute(Natural Science Edition)*, 2004, **18**(6): 47~50
- 甄 洁, 刘维亭. 蓝绿激光下行通信云层信道特性研究[J]. *华东船舶工业学院学报(自然科学版)*, 2004, **18**(6): 47~50
- 9 Wang Min , Liu Weihua. Study on optical characteristics of seawater in blue-green laser uplink propagation model [J]. *J. East China Shipbuilding Institute(Natural Science Edition)*, 2005, **19**(1): 59~61
- 王 敏, 刘维华. 蓝绿激光通信的海水信道光学特性研究[J]. *华东船舶工业学院学报(自然科学版)*, 2005, **19**(1): 59~61
- 10 Han Tianyu. Study of key technology of transmission in atmospheric channel of free space optical communication [D]. *Guangzhou, Guangdong University of Technol.*, 2005, 11~14
- 韩天愈. 自由空间光通信(FSO)大气信道传输关键技术的研究[D]. 广州, 广东工业大学, 2005, 11~14
- 11 D. Arnush, Underwater light-beam propagation in the small-angle-scattering approximation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972
- 12 Stottsl B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple scattering media[J], *Appl. Opt.*, 1978, **17**(4): 504~505