

文章编号: 0253-2239(2010)07-1945-05

大气气溶胶粒子的时延效应及其对激光程差的影响分析

袁宏武^{1,2,3} 梅海平¹ 黄印博¹ 饶瑞中¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 中国人民解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)

摘要 针对大气气溶胶粒子的时延效应影响激光测距精度的问题, 利用双频互相关函数, 推导了离散随机介质中激光程差的计算公式, 建立了激光程差与粒子浓度、粒子直径等常规参数间的联系。在此基础上, 提出了计算由大气气溶胶粒子的时延效应所引入的激光程差的方法, 并根据气溶胶和云雾的光学特性(OPAC)气溶胶模式, 计算了卫星对地激光测距时, 大气气溶胶粒子所造成的激光程差。结果表明, 当激光波长为 1064 nm, 气溶胶粒子的模式半径大于 0.25 μm 时, 随着模式半径的增大, 其造成的激光程差逼近 4.6 cm, 在毫米乃至亚毫米级激光测距精度要求下, 必须对其进行修正。

关键词 大气光学; 程差; 双频互相关函数; 气溶胶粒子

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.1945

Time Delay of Atmospheric Aerosol Particles and Its Effect on the Path Difference of Laser

Yuan Hongwu^{1,2,3} Mei Haiping¹ Huang Yinbo¹ Rao Ruizhong¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Time delay of atmospheric aerosol particles and its effect on the path difference of laser were discussed. Using two-frequency mutual coherence function, the equation of path difference in the discrete random medium was obtained and the relation between the path difference with the number density and diameter of particle was established. A new method for calculating the path difference caused by time delay of aerosol particles was presented, and the path difference was calculated by using typical modes provided by optical properties of aerosols and clouds (OPAC) package in satellite laser ranging. Results show that, when the wavelength of laser is 1064 nm and the mode radius of aerosol particles is more than 0.25 μm , the path difference is approaches 4.6 cm with the mode radius increasing; when the millimeter and even sub-millimeter precision of satellite laser ranging is required, the path difference induced by time delay of atmospheric aerosol particles should be corrected.

Key words atmospheric optics; path difference; two-frequency mutual coherence function; aerosol particles

1 引 言

由于激光测距具有极高的精度, 在测量、定位、通信和导航等方面得到了广泛应用。Hamal 等^[1]

在测绘、海洋探测和空间应用中对激光测距提出了毫米乃至亚毫米级的测距精度要求。针对“连续的”气体分子的时延效应对测距精度影响方面的研究已

收稿日期: 2009-09-09; 收到修改稿日期: 2009-10-22

基金项目: 国家 863 计划和国家自然科学基金(60705015)资助课题。

作者简介: 袁宏武(1979—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光传输方面的研究。E-mail: yuan_hong_wu@163.com

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气湍流和激光传输等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

经比较成熟,并建立了精度较高的修正模型^[2,3],而极少有学者考虑“离散的”云和气溶胶粒子的时延效应对激光测距精度的影响,相关的理论还不完善。

C. H. Liu 等^[4]在研究云、雨、雾以及湍流影响激光测距精度问题时,曾提出了利用时间矩求取激光脉冲时域统计特征的方法,给出了其平均到达时间及均方脉宽的计算公式和结果,但关于激光脉冲穿过云层后的平均到达时间的计算结果存在量级上的错误。本文应用时间矩方法重新推导和修正了激光程差的计算公式并加以验证,再根据气溶胶和云雾的光学特性(OPAC)气溶胶模式,给出了卫星对地激光测距(SLR)时,大气气溶胶粒子的时延效应所引入的激光程差的计算结果。

2 激光在离散随机介质中传播的时延效应

2.1 基本理论

A. Ishimaru 等^[5-7]对在离散随机介质中传播的激光脉冲的形状和脉冲持续时间进行了系统的研究,利用双频互相关函数来描述激光在离散随机介质中的传播特性,并采用时间矩的方法来表示激光通过离散随机介质后的时域统计特征。一阶矩代表了脉冲激光的平均到达时间,二阶矩代表了均方脉宽,三阶矩代表了时间偏度,四阶矩代表了时间峰度^[8]。

在离散随机介质中,假设满足前向散射近似,即 $ka \gg 1$ (k 为波数, a 为粒子的半径),则双频互相关函数 Γ 满足^[5,6]

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial z} + \frac{i}{2k_1 k_2} (k_2 \nabla_1^2 - k_1 \nabla_2^2) \Gamma + [n\sigma_t - P(\xi)] \Gamma = 0, \quad (1)$$

式中 n 是平均粒子数浓度, z 为传播距离, σ_t 是单个粒子的散射截面, $\nabla_i^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2}$ 为拉普拉斯算子, $\xi = \rho_1 - \rho_2$, ρ_1, ρ_2 为横向坐标, k_1, k_2 为波数。在前向散射的近似下, $P(\xi)$ 可表示为^[6]

$$P(\xi) \approx n\sigma_s \left(1 - \frac{k_d^2}{4k_c^2}\right) \exp\left(-\frac{\xi^2}{l^2}\right), \quad (2)$$

式中 $k_d = k_1 - k_2$, $k_c = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$, $l = \frac{(2\gamma_c^{1/2})}{k_c}$, $\sigma_s = \alpha\sigma_t$, α 是单个粒子的反照率, σ_t 是单个粒子的总散射截面, $\gamma_c = 2.5(D/\lambda)^2$, D 为粒子的直径, λ 为激光波长。对(2)式作拉普拉斯运算,并令 $\xi = 0$, 则 $\nabla_\xi^2 P(0)$ 为

$$\nabla_\xi^2 P(0) = -\frac{n\sigma_s k_c^2}{2\gamma_c}. \quad (3)$$

对于激光脉冲在离散随机介质中的传播,平均到达时间 $\langle t(z) \rangle_{av}$ ^[4] 为

$$\langle t(z) \rangle_{av} = t_0 + \frac{z}{c} \left[1 + \frac{r^2}{2F^2} + \frac{1}{2k_c^2 r^2} - \frac{z \nabla_\xi^2 P(0)}{4k_c^2} \right], \quad (4)$$

式中 t_0 是脉冲发射的参考时间, r 是高斯光束的束腰半径, F 为曲率半径。将(3)式代入(4)式,并考虑采用准直激光时, $F = \infty$, $r^2/2F^2 = 0$, $1/2k_c^2 r^2$ 项可以忽略不计,则(4)式可简化为

$$\langle t(z) \rangle_{av} = t_0 + \frac{z}{c} \left(1 + \frac{n\sigma_s z}{8\gamma_c} \right). \quad (5)$$

需要说明的是:当为均匀光路时, n 和 σ_s 与传播距离 z 无关;当为非均匀光路时, n 和 σ_s 与 z 有关,为此将 n 和 σ_s 写成 $n(z)$ 和 $\sigma_s(z)$ 形式,则(5)式变为

$$\langle t(z) \rangle_{av} = t_0 + \frac{z}{c} \left[1 + \frac{\int_0^z n(z') \sigma_s(z') dz'}{8\gamma_c} \right]. \quad (6)$$

由此可以看出,平均到达时间由两部分组成,第一部分为激光在真空中传播的时间延迟,第二部分是由散射粒子的时延效应所造成的,因此由散射粒子的时延效应所造成的激光程差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{\int_0^z n(z') \sigma_s(z') dz'}{8\gamma_c} = \frac{\int_0^z n(z') \sigma_s(z') z' dz'}{4\gamma_c}. \quad (7)$$

2.2 实验验证

由于非均匀光路上粒子的时延效应方面的研究尚未见公开报道,文中以均匀光路上粒子的时延效应^[9-15]对(7)式的可靠性加以验证。通常认为,云层中粒子的数浓度均匀分布,此时, n 和 σ_s 与 z 无关,则由于粒子散射造成的平均时延 Δt 可以写成

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c} = \frac{n\sigma_s z^2}{8c\gamma_c}. \quad (8)$$

D. G. Collins 等^[9]在夏威夷岛利用 TPART-III 系统验证了激光穿过云层时的脉冲时延和展宽。实验采用的激光是强度均匀的 532 nm 单色光,发射口径为 63.5 mm,发散角为 0.1 mrad,脉宽为 10 ns,发射点与接收点的距离为 765 m。实验结果为:对于光学厚度为 14.7 的云层,其平均时延为 1.0 ns,脉宽为 10.06 ns;对于光学厚度为 5.3 的云层,其平均时延为 1.0 ns,脉宽为 10.06 ns。同时利用气溶胶和云粒子探测仪器测量了实验时刻的粒子的半径、浓度和消光系数,如表 1 所示。将这些参数代入(8)式,得到光学厚度为 14.7 时的时延为 1.3 ns,光学厚度为 5.3 时的时延为 1.4 ns。可见计算结果与实验结果基本吻

合,(7)式是可靠的。

表 1 计算中选用粒子的物理参数

Table 1 Physical properties of selected particle

Diameter scale / μm	Extinction coefficient / km^{-1}	Number density / cm^3	Mass density / (g/cm^3)	Visibility / m
2~47	19.21	17.42	0.203	204
2~47	6.93	23.74	0.055	564

C. H. Liu 等^[4]考虑光波穿过积云的时延效应,采用红宝石激光,波长为 $0.6943 \mu\text{m}$,积云的水汽含量为 $0.062 \text{ g}/\text{m}^3$,粒子数浓度为 10^8 m^{-3} ,反照率近似为 1, $n\sigma_s \approx 4.03 \times 10^{-3} \text{ m}$, $r=5 \text{ cm}$, $F=\infty$, $z=5 \text{ km}$, $\gamma_c = 2.5(D/\lambda)^2$,得到层云粒子时延效应造成的时间延迟为 $6.5 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。C. H. Liu 等的计算结果存在明显的量级错误,因为按照球形粒子的假设,根据积云的水汽含量和粒子数浓度,可求得云层粒子半径 $a = 5.29 \mu\text{m}$, $\gamma_c = 580.52$,利用文献[4]中(42)式计算云粒子时延效应引入的时间延迟为 $1.43 \times 10^{-7} \text{ s}$,利用文中(8)式计算可得云层粒子的时延效应造成的时间延迟为 $7.2 \times 10^{-8} \text{ s}$,经比较发现,文献[4]在推导过程中出现遗漏,因此文中对此加以修正。

3 卫星对地测距中气溶胶粒子的激光程差算法

在星载对地激光测距中,气溶胶粒子数浓度在传播路径上是非均匀分布的,通常情况下随着高度增加,该浓度一般按指数关系下降^[12,13],即

$$\rho_n(a, h) = N(0) \exp\left(-\frac{h}{H_z}\right), \quad (9)$$

式中 $N(0)$ 为地面的气溶胶粒子数浓度, h 为高度, H_z 为标高,单位为 km 。为便于计算,文中采用分段均匀假设的方法,即将整个光程分为 M 小段,并假设每一小段气溶胶浓度分布是均匀的,段与段之间满足随高度增加,粒子数浓度按指数关系下降。则激光程差 ΔL 为

$$\Delta L = \sum_{i=1}^M \Delta l_i = \sum_{i=1}^M \frac{l^2 \rho_n(a, h_i) \sigma_s}{8\gamma_c}, \quad (10)$$

σ_s 为粒子的散射截面,在前向散射的近似下为^[5]

$$\sigma_s \approx |f_c(0)|^2 \pi / \gamma_c, \quad (11)$$

式中 $f_c(0)$ 是粒子的散射相函数 $f(\theta)$ 在角度 θ 等于零时的值,通常可写为^[5]

$$f_c(0) = \frac{ika^2}{m^2} \left[\frac{1}{2} m^2 - (m-1) \exp(m) - 1 \right], \quad (12)$$

式中 a 是粒子的半径, $m = i2ka(n-1)$, n 是粒子的复折射率系数。

4 计算结果与讨论

4.1 气溶胶模式

M. Hess 等^[10]将全球各地气溶胶粒子的尺度和光学参数整理成 OPAC 软件包,提供了 10 种气溶胶粒子的模式半径和标高,分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 气溶胶粒子的半径

Table 2 Radius of all types of aerosol

Component	$a_{\min}/\mu\text{m}$	$a_{\max}/\mu\text{m}$	$a_{\text{mod}N}/\mu\text{m}$
Insoluble	0.005	20.0	0.471
Water-soluble	0.005	20.0	0.0212
Soot	0.005	20.0	0.0118
Sea salt (acc. mode)	0.005	20.0	0.209
Sea salt (coa. mode)	0.005	60.0	1.75
Mineral (nuc. mode)	0.005	20.0	0.07
Mineral (acc. mode)	0.005	20.0	0.39
Mineral (coa. mode)	0.005	60.0	1.90
Mineral-transported	0.02	5.0	0.5
Sulfate droplets	0.005	20.0	0.0695

acc: accumulation; coa: coarse; nuc: nuclei

表 3 气溶胶粒子的标高

Table 3 Scale height of all types of aerosol

Component	H_{\min}/km	H_{\max}/km	H_z/km
Insoluble	0	12	8
	12	35	99
Water-soluble	0	12	8
	12	35	99
Soot	0	12	8
	12	35	99
Sea salt (acc. mode)	0	2	1
	2	12	8
Sea salt (coa. mode)	0	2	1
	2	12	8
Mineral (nuc. mode)	0	6	2
	6	12	8
Mineral (acc. mode)	0	6	2
	6	12	8
Mineral (coa. mode)	0	6	2
	6	12	8
Mineral-transported	0	3.5	99
	2	3.5	99
Sulfate droplets	0	12	8
	12	35	99

4.2 计算结果

以不可溶型粒子(Insoluble)为例,假设传输距离为

500 km,激光波长为 1064 nm,将整个光程分成 5×10^5 段,每段长度为 1 m,地面的粒子数浓度为 400 cm^{-3} ,粒子的复折射率为 $1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$. 计算得到粒子的散射截面为 $1.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,再根据(9),(10)式计算得出整个光程上不可溶型粒子造成的激光程差 $\Delta L = 0.0766 \text{ m}$. 表 4 给出满足 $ka \gg 1$ 的 6 种气溶胶粒子的时延效应造成的激光程差。

表 4 大气气溶胶粒子的时延效应造成的激光程差

Table 4 Path difference induced by time delay of aerosol particles

Component	Refractive Index	Path difference /m
Insoluble	$1.53 - 8.0 \times 10^{-3}i$	0.0766
Water-soluble soot	$1.52 - 1.55 \times 10^{-2}i$	-----
Sea salt (acc. mode)	$1.47 - 1.41 \times 10^{-4}i$	0.6440
Sea salt (coa. mode)	$1.47 - 1.41 \times 10^{-4}i$	0.0461
Mineral (nuc. mode)	$1.53 - 4 \times 10^{-3}i$	-----
Mineral (acc. mode)	$1.53 - 4 \times 10^{-3}i$	0.077
Mineral (coa. mode)	$1.53 - 4 \times 10^{-3}i$	0.0416
Mineral-transported	$1.53 - 4 \times 10^{-3}i$	0.0044
Sulfate droplets	$1.422 - 1.53 \times 10^{-6}i$	-----

4.3 讨论

从表 4 的计算结果看来,大气气溶胶粒子的时延效应造成的激光程差在厘米量级。由于计算公式受到前向散射 $ka \gg 1$ 的限制,表中部分气溶胶粒子的尺度不满足条件,所以无法利用上述方法计算其造成的激光程差。

图 1 给出了激光程差与气溶胶粒子类型及 ka 间的关系,从中可以看出,积聚型海盐 [Sea salt (accumulation mode)] 粒子造成的激光程差约为 65 cm,相对较大,对应的 $ka = 1.23$. 因此,造成激光程差计算的异常可能是 ka 满足 $ka > 1$,但是不满

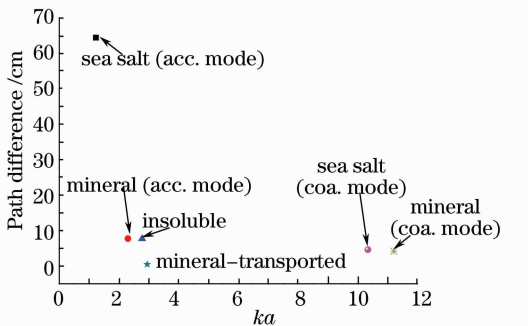


图 1 激光程差与粒子类型及 ka 间的关系

Fig. 1 Path difference versus ka with different aerosol types

足 $ka \gg 1$ 的条件。在激光波长确定的条件下, ka 主要取决于粒子的模式半径。图 2 给出了不可溶型粒子造成的激光程差随模式半径的变化情况,从中可以得到,随着模式半径的增大,激光程差逐渐减小,最后趋于常数,约为 4.6 cm;在模式半径约 $0.25 \mu\text{m}$ 处出现突变,当 $a_{\text{mod}N} < 0.25 \mu\text{m}$ 时,计算得到的激光程差增加到几十个厘米,与积聚型海盐粒子造成的激光程差是一致的。

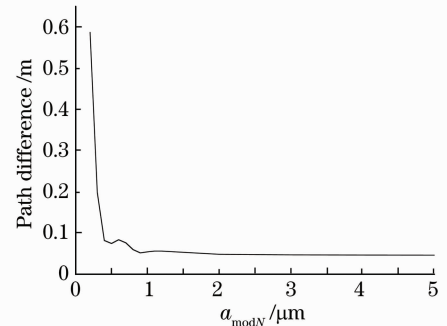


图 2 激光程差随不可溶型气溶胶模式半径的变化

Fig. 2 Path difference versus mode radius of insoluble aerosol

5 结 论

本文研究了大气气溶胶粒子的时延效应及其对激光程差的影响,从双频互相关函数出发,应用时间矩方法重新推导并修正了离散粒子的时间延迟和激光程差的计算公式,建立了激光程差与光学厚度、粒子直径等常规粒子参数间的联系,相关实验验证了该方法是有效的。针对卫星对地激光测距,提出了大气气溶胶粒子的激光程差算法,并利用 OPAC 气溶胶模式,计算了大气气溶胶粒子的时延效应所造成的激光程差。计算结果表明,大气气溶胶粒子的时延效应引入的激光程差约为厘米量级,对于毫米乃至亚毫米级的激光测距精度要求,必须对其加以修正。但应用该方法计算离散粒子的时延效应所造成的激光程差时,需满足 $ka \gg 1$ 的条件,当 ka 小于 1 或在 1 附近时,计算结果往往会出现异常,因此,当大气气溶胶粒子的参数不满足 $ka \gg 1$ 的条件时,如何计算其造成的激光程差是我们下一步研究的主要内容。

参 考 文 献

- 1 Lukas Kral, Ivan Prochazka, Josef Blazej *et al.*. Satellite laser ranging precision ultimate limit[C]. *SPIE*, 2004, **5240**: 26~30
- 2 Jon A. Schwartz. laser ranging error budget for the TOPEX/POSEIDON satellite [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29** (25): 3590~3596

- 3 C. S. Gardner. Effects of horizontal refractivity gradients on the accuracy of laser ranging to satellites[J]. *Radio Science*, 1976, **11**(12): 1037~1044
- 4 C. H. Liu, K. C. Yeh. Propagation of pulsed beam waves through turbulence, cloud, rain or fog[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **69**(9): 1261~1266
- 5 S. T. Hong, Akira Ishimaru. Two-frequency mutual coherence function, coherence bandwidth and coherence time of millimeter and optical waves in rain, fog and turbulence[J]. *Radio Science*, 1976, **11**(6): 551~559
- 6 S. T. Hong, I. Sreenivasiah a, Akira Ishimaru. Plane wave pulse propagation through random media [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, 1977, **25**(6): 822~828
- 7 Yang Ruike, Wu Zhensen, Yang Zhiyong. The numerical analysis of two-frequency mutual coherence function for infrared laser propagation in clouds [J]. *Internat. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(8): 1153~1162
- 8 Zhengwen Xu, Jian Wu, Zhensen Wu. Statistical temporal behavior of pulse wave propagation through continuous random media [J]. *Waves Random Media*, 2003, **13**(1): 59~73
- 9 D. G. Collins. Time delay and pulse stretching calculations for laser radiation propagation in clouds[J]. *Interim Report*, 1979
- 10 M. Hess, P. Koepke, I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds; the software package OPAC [J]. *Bull., Amer. Meteorological Sol.*, 1998, **79**(5): 831~844
- 11 Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1393~1397
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1393~1397
- 12 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573
韩道文, 刘文清, 刘建国 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1573
- 13 Wang Min, Hu Shunxing, Su Jia *et al.*. Measurements of refractive profiles using a pure rotational Raman lidar in the lower-atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1986~1991
王 敏, 胡顺星, 苏 嘉 等. 纯转动拉曼激光雷达反演低层大气折射率廓线[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1986~1991
- 14 Zhao Dong, Liu Liren, Wang Jiming *et al.*. A laser ranging method based on photon statistics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1091~1096
赵 栋, 刘立人, 王吉明 等. 基于光子数目比较的激光测距法 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1091~1096
- 15 Arindam Banerjee, Anil A. Ogale, Kunal Mitra. Experimental simulation of lightning optical emissions in clouds[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(3): 575~583