

doi:10.3788/gzxb20174611.1128001

基于斜程传输模型的卫星激光测距在气溶胶中探测性能的研究

陈煜丰^{1,2}, 安宁¹, 韩兴伟¹, 刘承志¹, 范存波¹, 温冠宇¹, 宋清丽¹, 董雪¹

(1 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 长春 130117)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于大气气溶胶在空间的不均匀分布, 提出并利用激光在大气气溶胶中的斜程传输模型开展卫星激光测距在气溶胶中探测性能的研究, 即将气溶胶的分布分为水平及垂直方向, 在垂直方向将其分为无穷多层, 令每层气溶胶的水平方向浓度分布均匀, 结合气溶胶粒子的散射截面、尺度分布函数, 计算激光在每层气溶胶中的透过率, 最后进行积分得到激光的大气传输透过率. 结果表明, 与 Kim 经验公式及 Mie 理论模型相比, 由斜程传输模型计算得到的激光气溶胶透过率更接近实验值, 其平均相对误差降低了一个数量级, 仅为 3.5%, 表明该模型可准确地计算激光在气溶胶中的传输特性. 结合激光雷达公式, 利用该模型对气溶胶中不同轨道高度卫星探测成功率进行数值模拟仿真, 发现在轻霾环境中低轨卫星的探测成功率可达 40% 以上, 高轨卫星的探测成功率仅为 15%, 可利用高效率探测器与高能量激光器实现轻霾环境下的卫星激光测距. 研究结果能合理解释已有的实验报道并有效地预估卫星激光测距系统探测性能, 为系统的升级改造提供可靠的理论依据和技术保障.

关键词: 卫星激光测距; 探测成功率; 斜程传输模型; 气溶胶; 透过率

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1128001-7

Research on the Detection Performance of Satellite Laser Ranging in Atmospheric Aerosol Based on the Slanting Transmission Model

CHEN Yu-feng^{1,2}, AN Ning¹, HAN Xing-wei¹, LIU Cheng-zhi¹, FAN Cun-bo¹,
WEN Guan-yu¹, SONG Qing-li¹, DONG Xue¹

(1 Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Jilin 130117, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the uneven distribution of atmospheric aerosol, the detection performance of Satellite Laser Ranging in atmospheric aerosol is researched based on the Slanting Transmission Model of the laser transmitted in atmospheric aerosol. The distribution of aerosol is divided into horizontal and vertical directions. The vertical direction is divided into infinite layers and the horizontal direction of each layer is regarded as the uniform distribution. Combining the scattering cross section and the scale distribution function of the aerosol particles, calculates the transmittance of the laser in each layer of aerosol, and integrals the atmospheric transmission of the laser finally. Compared with the empirical formula and Mie theory model, the transmittance value of laser in atmospheric aerosol calculated by Slanting Transmission Model is closer to the experimental value and the average of relative errors is only 3.5%, reducing by an

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(No.61605220)和吉林省科技厅基金(No.20170520155JH)资助

第一作者: 陈煜丰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星激光测距. Email: chenyf@cho.ac.cn

通讯作者: 安宁(1988—), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光电子技术及应用. Email: ann@cho.ac.cn

导师: 韩兴伟(1972—), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为卫星激光测距. Email: hanxw@cho.ac.cn

收稿日期: 2017-05-10; **录用日期:** 2017-06-29

<http://www.photon.ac.cn>

order of magnitude, which indicates that the Slanting Transmission Model is suitable for calculating the relationship between the laser transmittance in aerosol, aerosol visibility, and telescope elevation. Combined with the lidar formula, the Slanting Transmission Model is used to simulate the satellite detection probability of different orbital in aerosol, the results demonstrate that the detection probability of MEO and LEO satellites are more than 40%, but the GEO satellites is only 15%. And the Satellite Laser Ranging in light haze can be realized by the detector with high detection efficiency and the laser with high power. The results can give a reasonable interpretation for the previous experiment reports and show a certain reference value to the upgrading of SLR system in the future.

Key words: Satellite Laser Ranging; Detection Probability; Slanting Transmission Model; Aerosol; Transmittance

OCIS Codes: 280.0280, 280.110, 010.1110; 010.3310; 140.3460

0 引言

作为当前卫星精密定位观测重要手段,卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)通过精确测量超短激光脉冲在卫星与地面测站之间往返飞行时间,从而计算出地面观测站到卫星的距离,SLR技术是支持国际地球自转服务的关键技术手段之一,对监视大陆板块运动、地壳变化和地球自转等方面具有重要作用^[1-2].

随着SLR技术的日益成熟,现已实现晴朗天气下白天和夜间的常规观测.然而由于激光在气溶胶中传播过程时发生散射,激光能量衰减,导致系统回波光子数大幅减少,SLR在气溶胶环境下难以实现有效探测.因此,开展激光在气溶胶中的传输特性的研究对提高气溶胶中SLR性能是十分必要的.

目前,研究常选用Kim经验公式和Mie理论模型进行讨论分析.其中,Kim经验公式简洁方便,依据散射系数(激光波长和大气能见度)与视距的经验公式即可求出大气衰减系数.2007年,Muhammad利用Kim经验公式测量分析了不同类型雾对激光衰减特性^[3];2017年,Khan利用Kim经验公式测量分析了大陆雾条件下激光的衰减特性^[4];2015年,WuXiaojun利用Kim经验公式计算了海洋性雾与霾对激光的消光特性^[5].而Mie理论作为描述球形颗粒光散射的严格理论,只需假定颗粒材料是光学均匀且各向同性,由Maxwell方程组及边界条件推导出散射系数和消光系数,即可求出大气气溶胶对激光衰减系数.2011年,Martin利用Mie理论研究了云雾等悬浮物对激光的衰减特性随激光波长的关系^[6];2013年,王红霞利用基于Mie理论计算了1.06 μm 和10.6 μm 激光在雾、烟煤和沙尘气溶胶中水平传输特性^[7];2015年,Yang Yihong利用Mie理论计算了密集雾对激光信号传输的影响^[8].然而上述两种模型仅考虑了气溶胶粒子对激光的散射,均未考虑气溶胶的空间分布情况.这与气溶胶在实际空间中的不均匀分布不符,参考意义十分有限.

本文基于大气气溶胶在空间的不均匀分布,提出并利用激光在大气气溶胶中的斜程传输模型开展了激光在气溶胶中的传输特性研究.同时结合激光雷达公式,分析并讨论了高、中、低轨卫星的探测成功率随卫星高度和能见度的关系,为SLR系统预估卫星探测成功率提供重要参考依据,并为该系统的升级改造提供合理的设计思路及方案.

1 大气气溶胶对激光传输的影响

大气气溶胶主要指空气中的霾.霾是空气中的灰尘、硫酸、硝酸、碳氢化合物等组成的气溶胶.根据我国气象局报告参数,得到霾天气对应的参数见表1^[9].

表1 霾天气气象参数

Table 1 Meteorological parameter of haze

Weather	Particle radius/ μm	Visibility/km
Sunshine		>15
Light haze	0.1	4~10
Haze	0.3	2~4
Heavy haze	0.5	<2

目前,SLR主要使用0.532 μm 激光器作为探测光源,而霾粒子直径多在0.001~10 μm 之间.霾粒子尺寸与0.532 μm 激光波长相近,所以它对0.532 μm 激光产生衰减的散射为米氏散射.目前,研究激光在气溶

胶传输透过率的模型主要为 Kim 经验公式与 Mie 理论模型.

1.1 Kim 经验公式

根据 Kim 经验公式,激光在气溶胶传输的透过率 $T_{\text{exp}}(\lambda)$ 为^[7]

$$T_{\text{exp}}(\lambda) = \exp[-\csc(\theta) \cdot \mu(\lambda) \cdot S] = \exp\left[-\csc(\theta) \cdot S \cdot \frac{3.912}{V_b} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^a\right] \quad (1)$$

式中, $\mu(\lambda) = \frac{3.912}{V_b} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^a$ 为霾对 0.532 μm 激光的衰减系数; V_b 为能见度(km); λ 则为激光波长(μm); θ 为望远镜发射仰角; a 为改正因子,与能见度相关.在不同能见度下, a 的取值为

$$a = \begin{cases} 0 & (V_b \leq 0.5 \text{ km}) \\ V_b - 0.5 & (0.5 \text{ km} < V_b \leq 1 \text{ km}) \\ 0.16 \cdot V_b + 0.34 & (1 \text{ km} < V_b \leq 6 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < V_b \leq 50 \text{ km}) \\ 1.6 & (V_b \geq 50 \text{ km}) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 Mie 理论

由 Mie 理论^[10-12]可知,单个球形粒子散射总截面 $Q_{i,j}(D)$ 的计算公式为

$$Q_{i,j}(D) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (3)$$

式中, D 为粒子直径; a_n, b_n 为 Mie 散射系数,它们是复折射率、波长、粒子半径的函数; k 为粒子的尺度参数.对于尺寸一定的气溶胶粒子,单位距离所引起的信号衰减为

$$\mu(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} Q_t(r) n(r) dr \quad (4)$$

式中, r 为粒子半径; $n(r)$ 为粒子的尺度分布函数.则利用 Mie 理论模型得到的激光在气溶胶中传输的透过率 $T_{\text{Mie}}(\lambda)$ 的计算公式为

$$T_{\text{Mie}}(\lambda) = \exp[-\csc(\theta) \cdot \mu(\lambda) \cdot S] = \exp\{-\csc(\theta) \cdot S \cdot 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} \left[\frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \right] \cdot n(r) dr\} \quad (5)$$

式中, S 为激光传输的垂直距离.

2 斜程传输模型

由式(1)可知, Kim 经验公式只讨论了激光在气溶胶中传输透过率随能见度和波长的变化关系,但并未考虑到气溶胶粒子尺度分布、气溶胶折射率和气溶胶空间浓度分布等因素;由式(5)可知, Mie 理论模型通过分析气溶胶粒子对激光的散射特性,进而推导得出激光在气溶胶中的传输透过率,但并未考虑气溶胶的空间浓度分布情况.然而,大气气溶胶的实际空间分布是不均匀的,气溶胶浓度直接影响到激光的传输透过率.气溶胶浓度随高度呈指数变化,气溶胶浓度与空间高度的关系为^[13]

$$M(h) = M(0) \cdot \exp(-h/H_0) \quad (6)$$

式中, $M(h)$ 和 $M(0)$ 分别为高度 h 和地面的气溶胶粒子数浓度; H_0 为气溶胶标高,数值与地面能见度有关,关系如表 2^[13].

表 2 不同能见度条件下的气溶胶标高

Table 2 Scale height of aerosol in different visibility

Visibility/km	2	3	4	5	6	8	10	12	25
Scale height/km	0.8	0.9	0.95	0.99	1.03	1.10	1.15	1.23	1.45

相似的,气溶胶粒子尺寸分布也随着高度变化而变化^[13]

$$n_r(h) = n_r(0) \cdot \exp(-h/H_0) \quad (7)$$

由式(7)可知,气溶胶浓度随着高度增加呈指数关系下降.计算激光在气溶胶中的传输特性时,应充分考

考虑气溶胶的垂直分布情况.

本文提出了激光斜程传输模型,即激光在气溶胶中传输方向与水平夹角为 θ ;将大气空间在垂直高度上分为 m 层,每层厚度为 Δh , m 趋于无穷大,则 Δh 趋于无穷小;在每一层中,可认为气溶胶的浓度是均匀的,既激光在每一层的传输衰减系数是不变的,如图 1.

根据式(4)、(7)得到在高度为 h_i 层中的衰减系数为^[7]

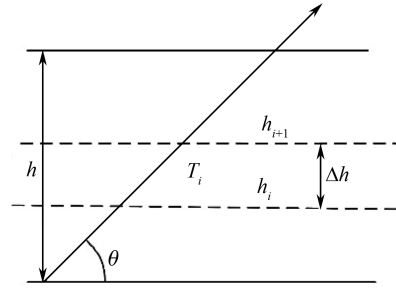


图 1 激光斜程传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser slanting transmission

$$\mu_\lambda(h_i) = 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty Q_i(r) \cdot n_r(0) \cdot \exp\left(-\frac{h_i}{H_0}\right) dr \quad (8)$$

则激光在这一层气溶胶中传输的透过率 $T_i(\lambda)$ 为

$$T_i(\lambda) = \exp[-\mu_\lambda(h_i) \cdot \Delta h / \sin(\theta)] \quad (9)$$

因此,激光在整层大气气溶胶中传输总的透过率 $T_{ST}(\lambda)$ 等于每层透过率的乘积

$$T_{ST}(\lambda) = \prod_i^n T_i(\lambda) = \prod_i^n \left\{ \exp\left[-\Delta h / \sin(\theta) \times 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^\infty (2n+1) \cdot \operatorname{Re}(a_n + b_n) n_r(0) \exp\left(-\frac{h}{H_0}\right) dr\right] \right\} \quad (10)$$

结合表 1、表 2 的参数,利用经验公式、Mie 理论模型和斜程传输模型计算得到 $0.532 \mu\text{m}$ 激光在气溶胶的透过率随望远镜发射仰角的关系,结果见图 2.由图 2 可知,三种模型计算的透过率都随望远镜发射仰角的增大而增大,当望远镜发射仰角达到 80° 时,三种模型计算的透过率增长速度平缓.当望远镜仰角为 90° 时,由斜程传输模型计算得到的激光的气溶胶透过率大约是 Mie 理论模型计算值的 5 倍,是经验公式计算值的 9 倍.

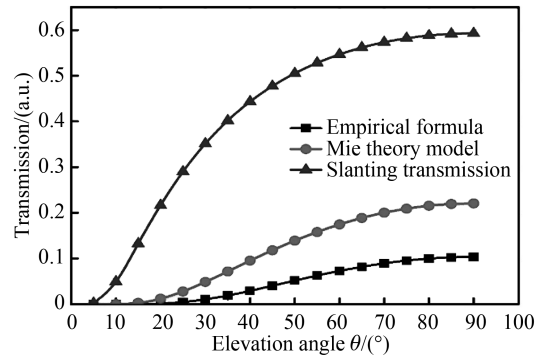


图 2 经验公式、Mie 理论模型与斜程传输模型计算结果比较
Fig.2 Comparison between empirical formula, Mie theory model and slanting transmission model

为了进一步验证斜程传输模型的适用性与准确性,利用已有实验数据对这三种模型计算的结果进行分析讨论,见表 3.由于目前只有 $10.6 \mu\text{m}$ 激光的实测数据^[14],故采用 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 进行计算. T_{exp} 、 T_{Mie} 、 T_{ST} 分别为利用经验公式、Mie 理论模型以及斜程传输模型得到的激光在气溶胶中透过率的计算值, T_0 为实验数据, δ 为相对误差.其中, δ 的计算公式为

$$\delta = 100\% \times |T - T_0| / T_0 \quad (11)$$

表 3 经验公式、Mie 理论模型、斜程传输模型计算值与实测数据相对误差

Table 3 Relative error between experiment data and empirical formula, Mie theory model, slanting transmission model

Elevation angle $\theta/(\circ)$	Experiment data		Empirical formula		Mie theory model		Slanting transmission model	
	T_0	T_{exp}	$\delta_1/\%$	T_{Mie}	$\delta_2/\%$	T_{XC}	$\delta_3/\%$	
10	0.639	0.340	94.56	0.033	99.03	0.702	10.00	
20	0.794	0.018	77.13	0.007	90.45	0.836	5.03	
30	0.084	0.311	63.55	0.170	80.00	0.884	3.60	
40	0.884	0.040	54.36	0.253	71.40	0.909	2.85	
50	0.902	0.467	48.24	0.315	65.03	0.923	2.35	
60	0.912	0.509	44.11	0.360	60.49	0.931	2.17	
70	0.919	0.537	41.52	0.390	57.52	0.937	1.95	
80	0.923	0.553	40.01	0.401	55.84	0.939	1.81	
90	0.924	0.558	39.61	0.413	55.29	0.940	1.80	
Average error/ $\%$			55.90		70.56		3.50	

由表 3 可知,与经验公式以及 Mie 模型相比,由斜程传输模型计算的激光在气溶胶中透过率更接近实验值,其平均相对误差减小了一个数量级左右,为 3.5%,而经验公式和 Mie 理论模型计算的透过率与实测数据平均相对误差高达 55.9%和 70.56%,表明斜程传输模型可准确地计算出激光在气溶胶中的传输透过率.

3 气溶胶中 0.532 μm 激光卫星测距系统的探测成功率

由激光雷达方程可知,激光照射卫星反射回来的光子数 N_s 为^[15-16]

$$N_s = \frac{16E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2} \quad (12)$$

式中, E 为激光单脉冲能量,取为 20 mJ; S 为每焦耳能量的光子数,取为 2×10^{18} ; A_s 为卫星上角反射器的有效面积,取为 300 cm²; A_r 为接收望远镜的有效面积,取为 1 m²; K_t 为发射系统的效率,取为 0.6; K_r 为接收系统的效率,取为 0.3; T 为透过率; η 为探测器的量子效率,取为 0.2; α 为衰减因子(包括卫星反射器效率、大气湍流等影响),取为 13 dB; R 为卫星距离; θ_t 为激光束发散角,取为 17''; θ_s 为反射器发散角,取为 16.9''^[17].

目前,卫星激光测距系统中使用的大部分是单光子探测器.根据 Poisson 分布,产生一个光子以上的概率为^[18]

$$P_D = 1 - \exp(-N_s) \quad (13)$$

则激光在气溶胶传输的探测成功率为

$$P = (1 - P_{FA}) \cdot P_D = (1 - P_{FA}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{16 \cdot E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2}\right) \right] \quad (14)$$

式中, P_{FA} 为背景噪声的虚警概率,在夜间值为 0.

基于斜程传输模型,结合式(11)、(13)、(14),利用 Matlab 对霾环境下,0.532 μm SLR 系统的探测成功率进行数值模拟,结果如图 3.由图 3 可知,在霾环境下,SLR 成功率随着气溶胶能见度的降低和卫星轨道高度的增加而降低.在晴朗夜晚(能见度 >15 km),对于轨道高度为 1 000 km 左右的低轨道卫星,探测成功率趋于 100%;对于轨道高度为 5 000 km 左右的中轨卫星探测成功率趋于 80%;对于轨道高度为 10 000 km 的高轨卫星探测成功率趋于 40%.在轻霾环境(能见度在 4~10 km)中,低轨道卫星的探测成功率降低到 60%左右;中轨道卫星探测成功率降低到 40%左右;高轨道卫星探测成功率低至 15%左右.在霾(能见度在 2~4 km)以及重霾(能见度 <2 km)环境中,高、中、低轨道卫星的探测成功率都几乎为零.为了验证上述结果的合理性,将计算值与实测数据进行对比.以在晴朗夜晚条件下中低轨道卫星的探测成功率为例,表 4 是通过该模型计算的理论与实际观测数据的对比结果.

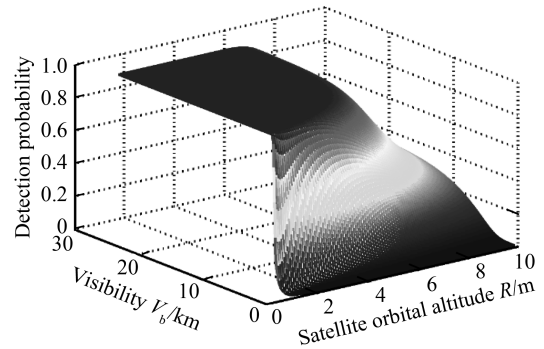


图 3 霾环境下 0.532 μm 激光卫星测距探测成功率随能见度和卫星轨道高度的关系

Fig.3 Relationship of SLR detection probability in different visibility and satellite orbital altitude in haze with 0.532 μm laser

表 4 夜间回波探测成功率^[17]

Table 4 Detection probability of SLR innighttime

Stations	Shanghai	Changchun	Graz	Wettze
Satellite	LAGESO-1	BE-C	LAGEOS	AJISAI
Satellite orbit altitude/km	5 850	927	5 900	1 485
Highest detection probability/%	83	83	80	97
Calculated value/%	88	100	88	100

从表 4 可以看出,由理论模型计算得到的晴朗夜晚下中低轨道卫星的探测成功率与实际数据基本符合,相对误差在 7%以内,可在实际观测前利用上述理论模型对观测成功率进行有效评估.为了实现高轨道卫星

在轻霾环境中的探测,结合方程(15)计算得到了激光能量、探测器的探测效率与探测成功率的关系,见图4.由图4可知,对于高轨卫星探测,增大激光单脉冲能量和提高探测器效率可有效提高高轨卫星探测成功率.但是这两项指标也并不能随意增加.对于单脉冲激光器,过高的激光能量会增加系统运行成本,导致输出不稳定、使传输过程中产生热晕,现在脉宽达到纳秒级别的激光器单脉冲能量可以达到50 mJ;对于探测器,目前市场上的硅探测器效率可达到40%.综上,如果增大激光器单脉冲能量至50 mJ,同时选用探测效率为40%的硅探测器(如美国APOLLO测站的G-APD阵列探测器^[19-20]),可将高轨道卫星的探测成功率从15%提高至60%,进而实现高轨卫星在轻霾环境下的有效探测.

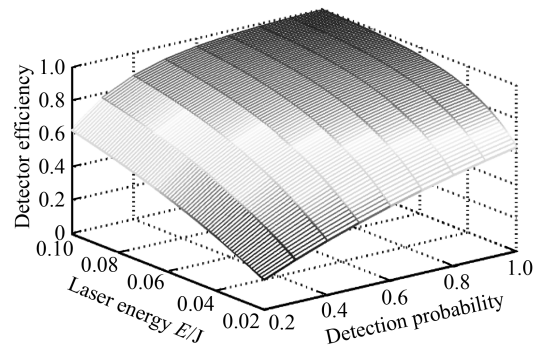


图4 探测成功率随激光能量和探测器效率的变化
Fig.4 Detection probability with different laser energy and detector efficiency

4 结论

本文基于气溶胶在实际空间中的不均匀分布,提出了激光斜程传输模型,分析讨论激光在大气气溶胶传输透过率与望远镜发射仰角的关系.与实测数据相比,利用斜程传输模型计算得到的激光在气溶胶中的传输透过率平均误差仅为3.5%,远小于常见的经验公式(55.9%)和Mie理论模型(70.5%)的平均误差,表明斜程传输模型可有效计算激光在气溶胶中传输的透过率.结合激光雷达公式,对气溶胶中 $0.532\ \mu\text{m}$ 激光卫星测距系统的探测成功率进行数值仿真.结果表明,中低轨道卫星探测成功率可达40%,而高轨道卫星探测成功率小于15%.基于研究现状,若探测器效率提高到40%,激光单脉冲能量值增大至50 mJ,则高轨卫星的探测成功率可提高至60%,从而实现轻霾环境中高轨道卫星的探测.本研究结果能有效地预估SLR系统探测性能,提高系统的探测效率和仪器使用寿命,为系统的升级改造提供合理的理论依据.

参考文献

- [1] CHENG M, RIES J C, TAPLEY B D. Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2011, 116(B0):1409.
- [2] APPLEBY G, RODRIGUEZ J, ALTAMIMI Z. Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations and estimated impact on ITRF scale: estimation of systematic errors in LAGEOS observations 1993-2014 [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(12): 1-18.
- [3] MUHAMMAD S S, FLECKER B, LEITGEB E, et al. Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 066001.
- [4] KHAN M S, AMIN M, AWAN M S, et al. Statistical modeling of optical attenuation measurements in continental fog conditions[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 036113-036113.
- [5] WU Xiao-jun, WANG Hong-xing, SONG Bo. Measurement of fog and haze extinction characteristics and availability evaluation of free space optical link under the sea surface environment[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 1015-1026.
- [6] GRABNER M, KVICERA V. The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication[J]. *Optics express*, 2011, 19(4): 3379-3386.
- [7] WANG Hong-xia, ZU You-zhang, TIAN Tao, et al. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 316-325.
王红霞,竹有章,田涛,等.激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 316-325.
- [8] YANG Yi-hong, MANDEHGAR M, GRISCHKOWSKY D R. Broadband THz signals propagate through dense fog[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(4): 383-386.
- [9] 董健业.激光大气传输仿真系统的研究与应用[D].北京:北京邮电大学,2008:40-50.
- [10] DAVE J V. Scattering of visible light by large water spheres[J]. *Applied Optics*, 1969, 8(1): 155-164.
- [11] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [12] REN Hong-guang, YU Hai-shan, HUO Li-jun. Extinction characteristic of laser transmitted in fog[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1101001.
任宏光,于海山,霍力君.激光在云雾中传输的消光特性[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1101001.
- [13] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990:16-20
- [14] ZHANG Guang-shun, WU Cheng-quan, WANG Guang-hua, et al. Measurement of infrared total atmospheric

- transmittance[J]. *Meteorological Monthly*, 1989, (11): 47-50.
- 张广顺,吴承权,王光华,等. 红外长窗区大气透过率的测量[J]. *气象*, 1989, (11): 47-50.
- [15] BO Guang-yu, XIE Chen-bo, WANG Bang-xin, *et al.* Observational study of aerosol distribution over Jing-jin-ji area using airborne lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0901007.
- 伯广宇,谢晨波,王邦新,等. 机载激光雷达探测京津冀地区气溶胶的空间分布[J]. *光学学报*, 2015, **35**(9): 0901007.
- [16] YANG Zi-jian, CHEN Feng, LI Chao, *et al.* Transient effect of dead time of photon-counting in micro-pulse lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 408-414.
- 杨子健,陈锋,李抄,等. 微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(2): 408-414.
- [17] WU Zhi-bo, ZHANG Zhong-ping, YANG Fu-min, *et al.* Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, **31**(3): 28-29.
- 吴志波,张忠萍,杨福民,等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. *测绘科学*, 2006, **31**(3): 28-29.
- [18] HUANG Ke, LI Song, MA Yue, *et al.* Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016(11): 229-234.
- 黄科,李松,马跃,等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. *中国激光*, 2016(11): 229-234.
- [19] MURPHY T W, ADELBERGER E G, STRASBURG J D, *et al.* Apollo: multiplexed lunar laser ranging [C]. Washington, DC: In 13th International Workshop on Laser Ranging, 2002.
- [20] STRASBURG J D, MURPHY J T W, ADELBERGER E G, *et al.* The advantages of avalanche photodiode (APD) arrays in laser ranging applications[C]. Washington, DC: In 13th International Workshop on Laser Ranging, 2002.