

基于激光雷达大气修正模型的卫星激光测距回波特性研究

吕柏韬^{1,2}, 安宁^{1*}, 韩兴伟¹, 程程³, 冯效华⁴, 张远达⁴, 高健¹, 宋清丽¹, 刘承志¹¹中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国人民解放军93175部队, 吉林 长春 130117;⁴中国人民解放军95975部队, 甘肃 酒泉 732750

摘要 卫星激光测距(SLR)平均回波光子数是表征系统探测能力的重要参数之一,与激光大气传输特性紧密联系。基于Mie散射理论,结合气溶胶粒子的实际分布情况,提出并利用激光雷达大气修正(LAC)模型计算SLR系统平均回波光子数,以长春站60 cm SLR系统为例,分析气候条件对SLR系统平均回波光子数的影响。结果表明,SLR系统平均回波光子数随地表附近能见度增大而增加,随相对湿度增大而减少。当望远镜俯仰角大于15°时,能见度对平均回波光子数的影响将超过相对湿度,并且在俯仰角为60°左右时达到峰值。阐述了气候条件影响SLR探测性能的内在机制,并为SLR系统选址与性能评估提供了新的理论方案和技术支持。

关键词 卫星激光测距; 平均回波光子数; 大气透过率; 激光雷达方程

中图分类号 P228.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231503

1 引言

卫星激光测距(SLR)是卫星单点测量精度最高的一种空间大地测量技术,在确定卫星轨道参数、地心运动、低阶重力场等方面具有重要作用^[1]。在SLR工作过程中,大气散射效应、大气吸收效应以及大气湍流效应会使大气信道传输过程中的激光能量不断降低,直接影响SLR系统平均回波光子数的大小及最大探测距离^[2-3]。同时,气溶胶粒子散射将引起激光传输路径变化,不利于SLR观测目标定位及测距精度的进一步提高^[4]。

国内外有关激光大气传输特性对SLR系统测距性能的研究较少。2012年,郭婧等^[5]针对激光在大气中的单程传输过程,计算了由气象条件引起的脉冲展宽及测距误差。2015年,Steinvall等^[6]分析了低能见度下的激光测距系统性能。2016年,李明等^[7]设定了当地的激光平均大气透过率,利用实测数据的稀疏性退化模型计算了SLR系统的最大探测距离。同年,Degnan^[8]基于能见度与散射系数的经验关系计算了不同卫星的SLR系统平均回波光子数。2017年,唐美荣等^[9]利用间歇性湍流的She模型阐明了大气湍流间隙性对SLR系统平均回波光子数的影响。2021年,

Busygin等^[10]建立了上层和云层的大气层光学模型,分析了532 nm波长激光经过不同类型的云时的测距结果。

为进一步探究气象条件对SLR系统探测性能的影响,本文基于Mie散射理论,结合气溶胶粒子的实际分布情况,提出并利用激光雷达大气修正(LAC)模型计算SLR系统平均回波光子数。同时利用长春站LAGEOS-1卫星实测结果对上述模型进行实验验证,分析该模型的适用性及有效性,为研究SLR回波特性提供理论参考。

2 LAC模型

SLR系统平均回波光子数是地面站、卫星、大气等多种因素综合作用的结果,常采用激光雷达方程进行计算。单次脉冲回波在接收光敏面上产生的平均光子数 N_s ^[11]为

$$N_s = \frac{16E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \beta}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2}, \quad (1)$$

以长春站kHz卫星激光测距系统为例,式中: E 为532 nm波长激光单脉冲能量,取1 mJ; S 为每焦耳能量的光子数,取 $2.8 \times 10^{18} \text{ J}^{-1}$;设观测目标为LAGEOS-1, A_s 为卫星上反射器的有效面积,取 257 cm^2 ; A_r 为接

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-09-26; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(12073052)、吉林省自然科学基金(20230101006JC)、中国科学院国际人才计划(2024VMA0009)

通信作者: *ann@cho.ac.cn

收镜的有效面积,取 0.251 m^2 ; K_t 为发射系统的效率,取 0.6 ; K_r 为接收光学系统的效率,取 0.5 ; T 为当地大气透过率; η 为接收光电器件的量子效率,取 0.2 ; β 为衰减效率,取 -13 dB ; R 为测站到卫星的斜距; θ_t 为激光光束发散角(经过发散镜),取 $12''$; θ_s 为卫星反射器的光束发散角,取 $13''$ 。

激光雷达方程是一个理想方程,并未考虑系统的跟踪误差及指向误差。假设跟踪误差符合高斯正态分布,且望远镜方位、俯仰跟踪误差概率分布相同,则单个脉冲的平均回波光子数 $\langle N_s \rangle$ ^[12] 为

$$\langle N_s \rangle = N_s \frac{\theta_{dj}^2}{\theta_j^2} = N_s \frac{1}{1 + \frac{\theta_j^2}{\theta_s^2}}, \quad (2)$$

式中: θ_{dj} 为跟踪误差和发散角的中间变量; θ_j 为方位或俯仰的跟踪误差。假定跟踪误差为 $5''$, 由标准正态分布表可得, 卫星处于发散角 $12''$ 之内的概率为 98.36% 。

天空背景噪声是 SLR 系统白天测距主要的干扰

源。对于单光子探测器来说,接收到的噪声光子数 n_b 表示为

$$n_b = \frac{\pi}{4} N_\lambda \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot q \cdot K_r \cdot \eta \cdot \tau_G, \quad (3)$$

式中: N_λ 为背景亮度,白天取 $3.4 \times 10^{19} \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$; θ_r 为接收视场角,取 $40''$; q 为干涉滤光片透过波段与接收光学系统和接收器件的响应波段之比,取 $1/500$; τ_G 为距离门宽度,取 100 ns 。由于光电转换产生的光电子数满足泊松分布,探测概率 P_D 和虚警概率 P_{FA} ^[13] 表示为

$$P_D = 1 - e^{-\langle N_s \rangle} \sum_{m=0}^{n_{th}-1} \frac{\langle N_s \rangle^m}{m!}, \quad (4)$$

$$P_{FA} = 1 - e^{-n_b} \sum_{m=0}^{n_{th}-1} \frac{n_b^m}{m!}, \quad (5)$$

式中, n_{th} 是探测器的探测阈值。对于单光子探测器 C-SPAD 来说, $n_{th} = 1$, 单次脉冲成功探测到的平均回波光子数 N_p 为

$$N_p = P_D \cdot (1 - P_{FA}) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} N_\lambda \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot q \cdot K_r \cdot \eta \cdot \tau_G\right) \times \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{16E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot T \cdot K_r \cdot \eta \cdot \beta}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2 \cdot \left(1 + \frac{\theta_j^2}{\theta_s^2}\right)}\right] \right\}. \quad (6)$$

在现有的激光雷达方程中,大气透过率 T 通常采用经验公式计算^[14-15], 记为 $\tau(\lambda, \theta)$:

$$T = \tau(\lambda, \theta) = \tau(\lambda, 90^\circ)^{\sec(90^\circ - \theta)}, \quad (7)$$

式中, λ 为传输波长, θ 为望远镜观测俯仰角。

然而,大气透过率 T 受多种因素,包括传输路径上大气成分、各组分含量分布、大气压强、温度、湿度以及气溶胶特性等^[16] 的影响。图 1 为 SLR 系统中激光斜程传输过程。

对于 532 nm SLR 系统,激光波长位于可见光吸收带, CO_2 、 H_2O 、 O_2 、 O_3 分子吸收微弱,对大气衰减起主

要作用的是大气气溶胶粒子散射^[17-18]。在水平方向上,气溶胶粒子数密度是均匀的,而在斜程或者垂直方向上,气溶胶粒子空间分布不均匀,其数密度 $n(r)$ 随垂直高度的增加呈指数衰减^[19], 表示为

$$n_h(r) = n_0(r) \cdot \exp\left(-\frac{h}{z}\right), \quad (8)$$

式中: $n_h(r)$ 为高度 h 处的气溶胶粒子数密度, r 为粒子半径; z 为气溶胶标高; $n_0(r)$ 为初始位置的粒子数密度(粒子谱)。受地表附近能见度 V 的影响^[20]:

$$z = 0.6841V^{0.2321}, \quad (9)$$

$$n_0(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \exp(-0.8359V^{0.43}r). \quad (10)$$

将大气纵向距离分为 n 层,每层高度为 Δh , n 趋于无穷大,则 Δh 趋于无穷小,每一层都视为以该层大气参数平均值表征的均匀介质。则第 i 层的透过率 T_i 为

$$T_i(\lambda) = \exp\left[-\frac{\Delta h}{\sin \theta} \int_0^\infty Q(r) \cdot n_0(r) \cdot \exp\left(-\frac{h_i}{z}\right) dr\right], \quad (11)$$

式中, Q 为单个气溶胶粒子的散射截面。由 Mie 散射理论^[21] 可知, Q 表示为

$$Q(r) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^\infty (2n+1) \cdot \text{Re}(|a_n| + |b_n|) \cdot \pi r^2, \quad (12)$$

式中: x 为尺寸参数; a_n 、 b_n 为 Mie 散射系数,与复折射率 n_{re} 、 n_{ie} 相关; $\text{Re}(\bullet)$ 表示取实数。上述参数都受相对

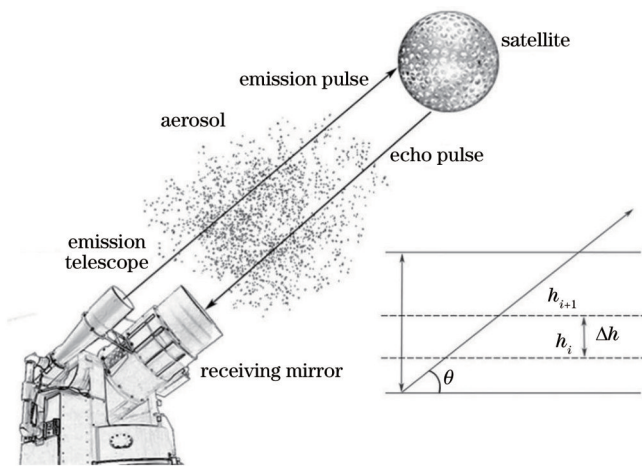


图 1 SLR 系统激光斜程传输过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser slanting transmission

湿度的影响^[22],表示为

$$x = \frac{2\pi r p}{\lambda}, \quad (13)$$

$$p = \frac{r(f)}{r} = (1-f)^{-\frac{1}{\mu}}, \quad (14)$$

$$n_{re} = n_{rw} + (n_r - n_{rw}) p^{-3}, \quad (15)$$

$$n_{ie} = n_{iw} + (n_i - n_{iw}) p^{-3}, \quad (16)$$

式中: p 为干湿粒子半径比; f 为相对湿度; μ 为经验系数; n_r 和 n_i 分别为干粒子的复折射率实部和虚部; n_{rw} 和 n_{iw} 分别为水的复折射率实部和虚部。结合式(8)~

(16),SLR激光斜程传输过程中的激光大气透过率 T_{SR} 可以表示为

$$T_{SR}(\lambda) = \prod_{i=1}^n \exp \left[-\frac{\Delta h}{\sin \theta} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot \operatorname{Re}(|a_n| + |b_n|) \cdot \pi (rp)^2 \cdot n_0(r) \cdot \exp \left(-\frac{h_i}{z} \right) dr dh \right]. \quad (17)$$

为验证式(17)的适用性,计算整层大气透过率随俯仰角的变化,并与大气窗口区的450、500、550 nm波段的整层大气透过率实测数据进行对比^[23-25]。图2为上述理论计算结果与不同波段激光大气透过率的实测值。

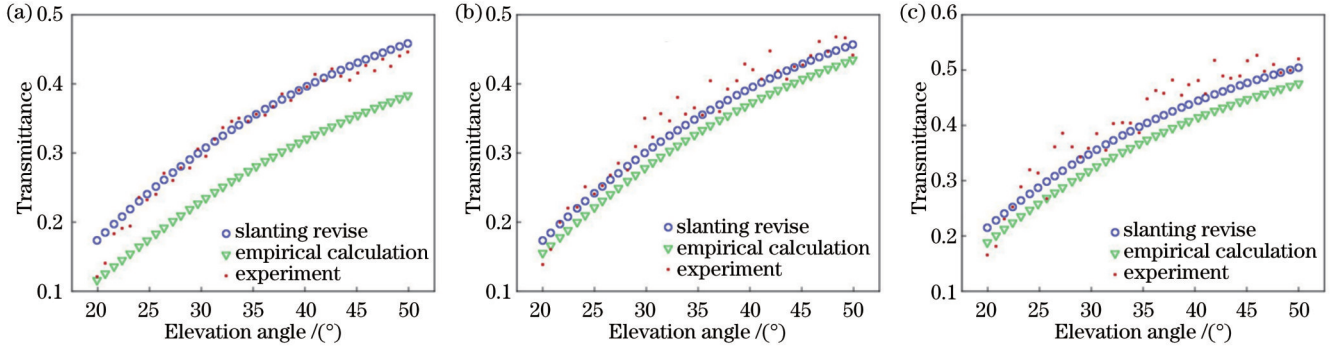


图2 各波段实测结果与斜程修正和经验计算方法计算结果对比。(a) 450 nm;(b) 500 nm;(c) 550 nm

Fig. 2 Comparison between measured results and the calculation results of slanting revise and empirical calculation.

(a) 450 nm; (b) 500 nm; (c) 550 nm

从图2可以看出:理论计算结果与实测结果变化趋势一致。激光大气透过率随传输波长的增加而增大。当传输波长一定时,激光大气透过率随望远镜俯仰角的增大而增大。与常规激光雷达方程中采用的经验公式相比,利用式(17)得到的激光大气透过率 T_{SR} 与实测数据更为相符。表1为计算结果与实测数据的平均相对误差。

表1 激光斜程修正、经验计算方法计算值与实测大气透过率的平均相对误差

Table 1 Average relative errors of transmittance between experiment data and slanting revise, empirical calculation

Wavelength /nm	Average relative error /%	
	Slanting revise	Empirical calculation
450	5.016	19.840
500	5.301	9.988
550	7.658	12.774
Mean	5.992	14.201

从表1可以看出,与常规激光雷达方程采用的经验公式[式(7)]相比,利用激光斜程修正理论[式(17)]计算的大气透过率的三个波段的平均相对误差由14.201%减小到5.992%,减小了一个数量级左右,表明该模型可有效表征激光在大气中的传输特性。为此,将式(17)代入式(6),建立LAC模型:

$$N_p = \exp \left(-\frac{\pi}{4} N_\lambda \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot q \cdot K_r \cdot \eta \cdot \tau_G \right) \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{16E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot T_{SR}^2 \cdot K_r \cdot \eta \cdot \beta}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2 \cdot \left(1 + \frac{\theta_i^2}{\theta_s^2} \right)} \right] \right\}, \quad (18)$$

式中, T_{SR} 为激光斜程修正大气透过率。

3 实验验证

为验证上述模型的适用性与准确性,以长春站60 cm SLR系统为例,将LAGEOS-1卫星设为观测目标,观测并统计单位时间内LAGEOS-1的平均回波光子数。图3为长春站60 cm SLR系统结构。

长春站SLR系统工作过程如下:首先,基于LAGEOS-1卫星预报星历获得目标卫星在测站坐标系的方位、高度及距离。当LAGEOS-1卫星相对于长春站的仰角高度大于20°之后,通过控制系统引导望远镜实时跟踪目标,待跟踪稳定后发射激光脉冲。与此同时,经PIN(positive-intrinsic-negative)光电二极管将激光脉冲信号送入恒比鉴别器(CFD)记录发射时刻,激光脉冲至LAGEOS-1卫星返回的回波信号由接收系统接收。然后,通过雪崩光电二极管(APD)将激光脉冲信号转化为电信号,电信号进入事件计时器,计时器记录回波时刻。最后,计算机通过两个时刻之差即

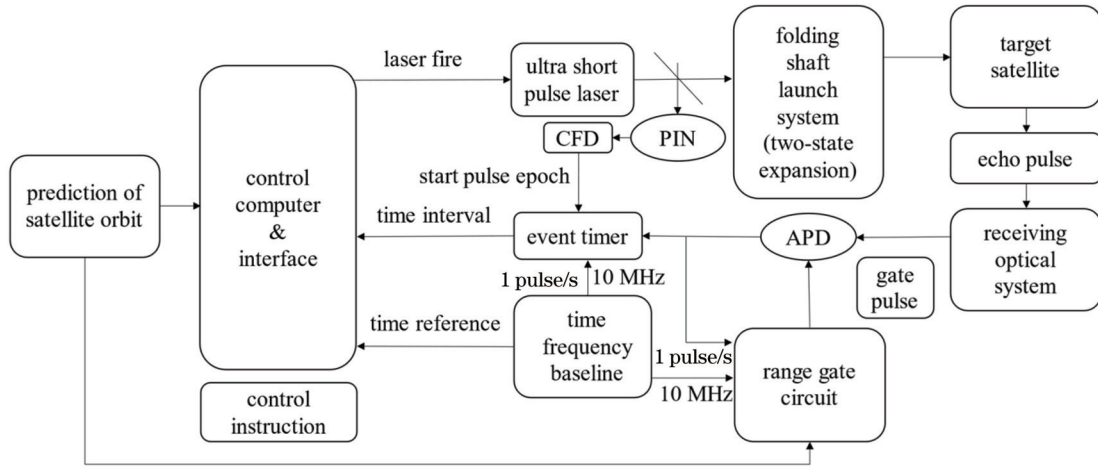


图 3 长春站 SLR 系统结构

Fig. 3 SLR system structure of Changchun Observatory

可获得目标卫星至测站的距离。

在获取 LAGEOS-1 观测数据后,利用标准点算法提取有效回波,并从已识别的回波数据中统计单位时间内(1 s)的平均回波光光子数及对应的平均观测俯仰角。同时,结合长春站气象条件与气溶胶粒子参数^[26],利用 LAC 模型计算单位时间内 SLR 系统的平均回波光光子数。图 4 为上述理论计算与实测结果对比。

从图 4 可以看出:利用 LAC 模型计算的 SLR 系统平均回波光光子数与实测结果基本相符。SLR 系统平均回波光光子数随望远镜俯仰角的增大而增加。这是因为随着望远镜俯仰角的增大,激光在大气中的传输路径将缩短,气溶胶粒子对激光的散射效应减弱,激光大气透过率增大,因此,SLR 系统平均回波光光子数也会随之增加。

为进一步验证 LAC 模型的适用性与准确性,比较了不同气象条件下的 LAGEOS-1 卫星的实验数据与理论结果。表 2 为单位时间内 SLR 系统平均回波光光子

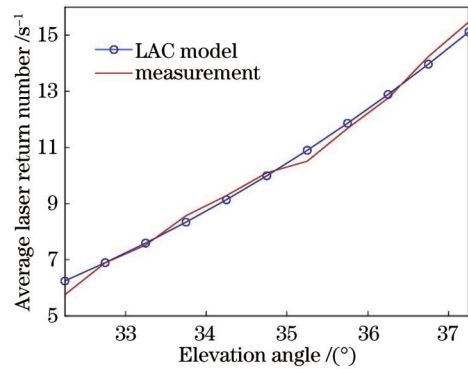


图 4 利用 LAC 模型计算的单位时间内 SLR 系统平均回波光光子数与实测结果(能见度为 9.2 km,相对湿度为 84%)

Fig. 4 Average laser return number per unit time of SLR system calculated using the LAC model and the measured results (visibility is 9.2 km, relative humidity is 84%)

数的计算结果与实测数据的相对误差。

表 2 不同气象条件下的单位时间内 SLR 系统平均回波光光子数理论与实测结果

Table 2 Theoretical and measurement results of average laser return number per unit time of SLR system under different meteorological conditions

Arch	Visibility /km	Relative humidity /%	Average elevation angle / (°)	Average relative error /%
1	9.0	66	41.484	13.4990
2	9.2	84	34.951	2.2957
3	9.3	74	43.711	4.9235
4	10.0	80	34.538	6.7899
5	11.1	45	55.053	10.4170
Mean				7.5850

从表 2 可以看出,利用 LAC 模型计算的单位时间内 SLR 系统平均回波光光子数的相对误差不超过 15%,平均相对误差仅为 7.5850%。这表明 LAC 模型可有效计算出 SLR 系统的平均回波光光子数,为 SLR 系统性评估提供合理参考。

4 分析与讨论

由式(18)可知,影响 SLR 系统平均回波光光子数的气候条件主要为能见度与相对湿度。为此,基于长春站 60 cm SLR 系统结构参数,将望远镜俯仰角设为

90°, 利用 LAC 模型分别仿真了长春站 SLR 系统单次脉冲的平均回波光子数与能见度、相对湿度的关系, 结果如图 5、图 6 所示。

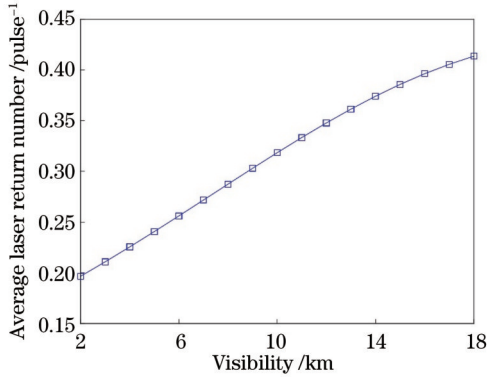


图 5 平均回波光子数随能见度的变化(相对湿度为 60%)
Fig. 5 Variation of average laser return number with visibility (relative humidity is 60%)

图 5 表明, 在相同相对湿度条件下, 平均回波光子数与能见度成正相关。这是因为能见度越高, 气溶胶粒子数密度越低, 空间分布越稀疏, 大气透明度越好, 激光受大气的衰减越弱, SLR 系统平均回波光子数也就越多。

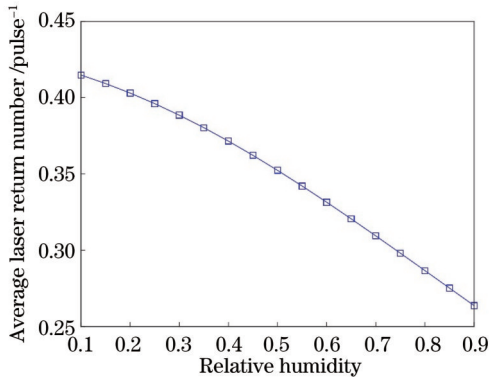


图 6 平均回波光子数随相对湿度的变化(能见度为 9 km)
Fig. 6 Variation of average laser return number with relative humidity (visibility is 9 km)

图 6 为 SLR 系统平均回波光子数与相对湿度之间的关系。可以看出, 在相同能见度条件下, 相对湿度越大, SLR 系统平均回波光子数越少。这是因为随着相对湿度增加, 湿气溶胶粒子所占半径比增大, 对激光能量的衰减增强, 导致 SLR 系统平均回波光子数减少。

为了进一步比较两个气象条件对平均回波光子数的影响, 计算能见度与相对湿度分别变化 1% 时 SLR 系统单次脉冲平均回波光子数的多少, 结果如图 7 所示。

图 7 表明: 随着俯仰角的增大, 能见度与相对湿度带来的影响也逐渐增大。当俯仰角小于 15° 时, 二者对平均回波光子数的影响基本一致; 当俯仰角大于 15° 时, 能见度对平均回波光子数的影响要略大于相对湿

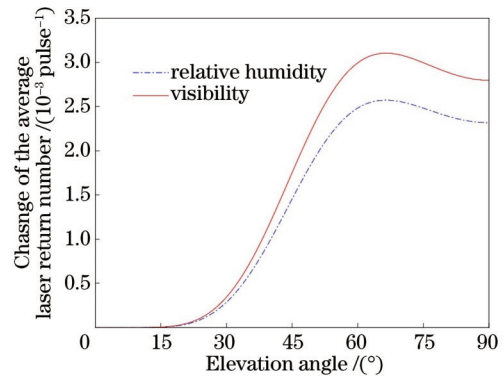


图 7 能见度与相对湿度对平均回波光子数的影响大小对比
Fig. 7 Comparison of the effects of visibility and relative humidity on the average laser return number

度, 且在俯仰角为 60° 左右达到最大值。另外, 基于 LAC 模型及长春站全年气候条件, 计算了 2022 年间单位时间内长春站 SLR 系统 LAGEOS-1 平均回波光子数的月变化率, 并与统计的实测结果进行了对比, 结果如图 8 所示。

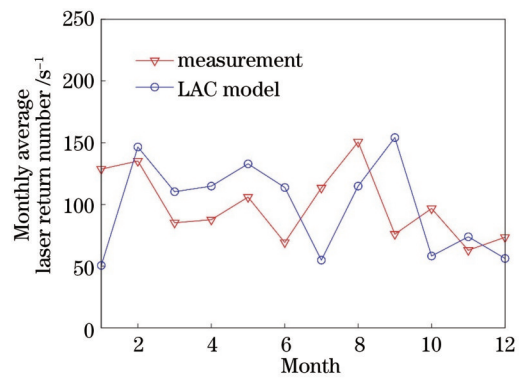


图 8 单位时间内长春站 SLR 系统 LAGEOS-1 平均回波光子数月变化
Fig. 8 Monthly variation of LAGEOS-1 average laser return number per unit time of Changchun Observatory SLR system

图 8 表明, 基于 LAC 模型计算的单位时间内长春站 SLR 系统平均回波光子数存在明显的季节性变化, 且变化幅度较大, 这与实测结果基本相符。这是因为长春属温带大陆性气候, 夏季(6 月至 7 月)水汽较重, 相对湿度较大, 激光大气透过率较低, 单位时间内 SLR 系统获取的平均回波光子数较少; 冬季(11 月至次年 1 月)雨雪等极端天气频发, 东北还有冬季烧秸秆的习惯, 导致能见度与相对湿度变化幅度较大, 大气透过率偏低, 单位时间内 SLR 系统平均回波光子数减少; 春季(2 月至 5 月)与秋季(8 月至 10 月)气候条件好, 能见度高, 相对干燥, 激光大气透过率高, 所以单位时间内 SLR 系统平均回波光子数也相对较高。

5 结 论

SLR 系统平均回波光子数是评估 SLR 系统探测

能力的重要参数之一,与激光的大气传输特性密切相关。为了有效评估 SLR 系统平均回波光子数,探究激光大气传输特性与 SLR 系统探测性能之间的关系,基于 Mie 散射理论和实际气象条件建立了 LAC 模型,计算了不同气象条件下的单位时间内 SLR 系统获取的平均回波光子数,并利用长春站 60 cm SLR 系统实际观测结果对模型进行验证。结果表明,与实测数据相比,利用上述模型计算得到的 SLR 系统平均回波光子数误差不超过 15%,证明模型可有效计算 SLR 系统的平均回波光子数。同时,该模型揭示了地表附近能见度与相对湿度是影响 SLR 系统平均回波光子数的主要因素,且 SLR 系统接收到的平均回波光子数与能见度成正比,与相对湿度呈反比关系。当望远镜俯仰角小于 15°时,能见度与相对湿度对平均回波光子数的影响基本一致。当望远镜俯仰角大于 15°时,能见度比相对湿度带来的影响略大,且在俯仰角为 60°左右影响达到峰值。此外,研究还发现,由于长春站所在地区属温带大陆性气候,单位时间内 SLR 系统接收的平均回波光子数存在明显季节变化现象。本文为激光大气传输研究提供了有价值的参考数据和模型借鉴,并为后续的 SLR 系统性能评估与 SLR 测站的选址提供了一个新的参考方案。

参 考 文 献

- [1] 邓华荣, 张海峰, 龙明亮, 等. 4 kHz 重复频率卫星激光测距系统及其应用[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0314002.
Deng H R, Zhang H F, Long M L, et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0314002.
- [2] 吴良海, 高隽, 范之国, 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0701005.
Wu L H, Gao J, Fan Z G, et al. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0701005.
- [3] 李树旺, 邵士勇, 梅海平, 等. 光热干涉法测量大气气溶胶粒子吸收特性的仿真分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101004.
Li S W, Shao S Y, Mei H P, et al. Simulation of atmospheric aerosol particle absorption characters based on photo-thermal interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101004.
- [4] 陈欣欣, 苑克娥, 时东锋, 等. 大气湍流对空基光学成像系统影响的仿真研究[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1801002.
Chen X X, Yuan K E, Shi D F, et al. Simulation study on the influence of atmospheric turbulence on space-based optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1801002.
- [5] 郭婧, 张合, 王晓锋. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0113001.
Guo J, Zhang H, Wang X F. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 0113001.
- [6] Steinvall O, Persson R, Berglund F, et al. Using an eye-safe laser rangefinder to assist active and passive electro-optical sensor performance prediction in low visibility conditions[J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): 074103.
- [7] 李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 260-267.
Li M, Xue L, Huang C, et al. Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 260-267.
- [8] Degnan J. An upgraded SGSLR link analysis which includes the effects of atmospheric scintillation and target speckle[EB/OL]. [2023-04-05]. https://cddis.nasa.gov/lw20/docs/2016/papers/40-Degnan_paper.pdf.
- [9] 唐美荣, 李祝莲, 李语强, 等. 大气湍流间歇性对激光测距回波光子数的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0201001.
Tang M R, Li Z L, Li Y Q, et al. Influence of atmospheric turbulence intermittency on return photon number in laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0201001.
- [10] Busygin V P, Ginzburg A S, Kuzmina I Y. Transfer of laser pulses through the atmosphere into space in the presence of clouds of the upper and middle tiers[J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2021, 57(6): 594-605.
- [11] Long M L, Zhang H F, Yu R Z, et al. Satellite laser ranging at ultra-high PRF of hundreds of kilohertz all day[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1036346.
- [12] Degnan J J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review[M]//Smith D E, Turcotte D L. Contributions of space geodesy to geodynamics: technology. Washington, DC: American Geophysical Union, 1993: 133-162.
- [13] 杨福民, 肖焜焜, 陈婉珍, 等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学(A辑), 1998, 28(11): 1048-1056.
Yang F M, Xiao C K, Chen W Z, et al. Design and measured results of daytime satellite laser ranging system[J]. Scientia Sinica (A), 1998, 28(11): 1048-1056.
- [14] 孟文东. 应用于中国空间站的激光时频传递系统及载荷关键技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2021: 23-24.
Meng W D. Research on laser time-frequency transmission system and key technology of load applied to China Space Station [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021: 23-24.
- [15] Shell J R. Optimizing orbital debris monitoring with optical telescopes[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://amstech.com/TechnicalPapers/2010/Systems/Shell.pdf>.
- [16] 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 18-22.
Sun J Q. Laser atmospheric detection[M]. Beijing: Science Press, 1986: 18-22.
- [17] 吕炜煜, 朱文越, 苑克娥, 等. 内陆地区近地面大气消光系数统计特征及气象要素影响分析[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2376-2380.
Lü W Y, Zhu W Y, Yuan K E, et al. Statistical characteristic on atmospheric extinction coefficient and impact analysis on meteorological elements of surface layer of inland area[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2376-2380.
- [18] 宋正方. 应用大气光学基础: 光波在大气中的传输与遥感应用[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 11-14.
Song Z F. Fundamentals of applied atmospheric optics: light wave transmission in the atmosphere and remote sensing application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 11-14.
- [19] 安宁, 陈煜丰, 刘承志, 等. 基于激光大气传输特性的卫星激光测距系统的最大探测距离[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0901003.
An N, Chen Y F, Liu C Z, et al. Maximum detection range of satellite laser ranging system based on characteristics of laser transmission in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0901003.
- [20] 魏昊明, 赵威, 戴星灿. 雾和气溶胶前向散射对消光的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1354-1361.
Wei H M, Zhao W, Dai X C. Influence of fog and aerosol particles' forward-scattering on light extinction[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1354-1361.
- [21] 王惠琴, 王彦刚, 曹明华, 等. 沙尘天气下大气能见度对激光光强的影响[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0229001.
Wang H Q, Wang Y G, Cao M H, et al. Impact of atmospheric visibility on laser intensity in sand and dust weather[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0229001.

- [22] Raut J C, Chazette P. Vertical profiles of urban aerosol complex refractive index in the frame of ESQUIF airborne measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(4): 901-919.
- [23] 冯全全, 詹杰, 刘庆, 等. 夜间整层大气透过率测量技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0617005.
Feng Q Q, Zhan J, Liu Q, et al. Study on measurement technology of total atmospheric transmittance at night [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0617005.
- [24] 周秀骥, 陶善昌, 姚可亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 740-820.
- Zhou X J, Tao X C, Yao K Y. *Advanced atmospheric physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 740-820.
- [25] Kent G S, Yue G K, Farrukh U O, et al. Modeling atmospheric aerosol backscatter at CO₂ laser wavelengths 1: Aerosol properties, modeling techniques, and associated problems [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(11): 1655-1665.
- [26] Segelstein D J. The complex refractive index of water [D]. Kansas City: University of Missouri, 1981: 116-145.

Satellite Laser Ranging Echo Characteristics Based on Lidar Atmospheric Correction Model

Lü Botao^{1,2}, An Ning^{1*}, Han Xingwei¹, Cheng Cheng³, Feng Xiaohua⁴, Zhang Yuanda⁴,
Gao Jian¹, Song Qingli¹, Liu Chengzhi¹

¹Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, Jilin, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Unit 93175, Chinese People's Liberation Army, Changchun 130117, Jilin, China;

⁴Unit 95975, Chinese People's Liberation Army, Jiuquan 732750, Gansu, China

Abstract

Objective Laser return number is an important parameter to perform the detection ability of a satellite laser ranging (SLR) system, which is proven to be closely related to the atmospheric transmission characteristics of laser. Accurate evaluation of the laser return number in the SLR system not only provides a theoretical basis for system design and optimization but also is a key issue and primary link in the future development of SLR automation systems. In SLR system operation, the atmospheric scattering effect, atmospheric absorption effect, and atmospheric turbulence effect continuously reduce the laser energy during atmospheric channel transmission, directly affecting the size of the average laser return number in the SLR system. The influence of the atmospheric environment on photon detection becomes increasingly evident as the detection distance further increases. To effectively evaluate the average laser return number in the SLR system and explore the relationship between laser atmospheric transmission characteristics and the detection performance of the SLR system, we should analyze the atmospheric transmission characteristics of lasers.

Methods Lidar atmospheric correction (LAC) model based on Mie scattering theory and actual meteorological conditions is built in our study. First, based on the tilted propagation theory of laser, the entire atmosphere transmittance at different wavelengths (450, 500, 550 nm) is calculated. Then, the average laser return number per unit time of the SLR system in different meteorological conditions is calculated, and the model is validated by the actual observation results of the 60 cm SLR system at Changchun Observatory. Finally, the effects of visibility and relative humidity on the average laser return number are analyzed.

Results and Discussions Compared with the empirical formula adopted in conventional lidar equations, the mean average relative error of atmospheric transmittance calculated using the laser slanting revise theory decreases from 14.201% to 5.992%, which is about an order of magnitude smaller (Fig. 2 and Table 1). The calculated average laser return number per unit time of SLR system based on the LAC model exhibits good consistency with the measured data, with an average relative error of less than 15% (Fig. 4 and Table 2). The average laser return number received by the SLR system is proportional to visibility and inversely proportional to relative humidity (Figs. 5 and 6). When the elevation angle of the telescope is less than 15°, the influence of visibility and relative humidity on the average laser return number is not significantly different. When the elevation angle of the telescope is greater than 15°, the influence of visibility is slightly greater than that of relative humidity, and reaches its peak around 60° (Fig. 7). Additionally, we also find that due to the temperate continental climate of Changchun Observatory, there are significant seasonal variations in the average laser return number per unit time received by the SLR system (Fig. 8).

Conclusions Average laser return number in SLR system is an important parameter characterizing the detection ability of

the system, which is closely related to the atmospheric transmission characteristics of lasers. Based on Mie scattering theory and the actual distribution of aerosol particles, the LAC model is proposed and employed to calculate the average laser return number in the SLR system. By taking the 60 cm SLR system at Changchun Observatory as an example, the effect of climate conditions on the average laser return number in the SLR system is analyzed. The results indicate that the average laser return number in SLR system increases with the rising visibility near the surface and decreases with the increasing relative humidity. When the elevation angle of the telescope is greater than 15° , the influence of visibility is greater than that of relative humidity, and their influence reaches its peak around 60° . Our study not only elucidates the inherent mechanism by which climate conditions affect the detection performance of SLR system but also provides new theoretical solutions and technical support for SLR system site selection and performance evaluation.

Key words satellite laser ranging; average laser return number; atmospheric transmissivity; lidar equation