

文章编号:1001-5078(2025)04-0554-08

· 激光应用技术 ·

单光子激光探测中大气传输及背景辐射的影响

缪瑞晴¹, 王励横², 徐广平¹, 韩隆¹, 许连望¹, 赵宇昊¹, 丁浩宇¹

(1. 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015;

2. 陆装驻北京地区第二军代室, 北京 100012)

摘要:单光子激光测距技术由于具有高探测灵敏度而被广泛应用于各种测距场景。为探究单光子探测体制下,大气传输和背景辐射参数对1064 nm波段背景噪声的影响,本文使用两种大气辐射传输仿真工具MODTRAN和CART对水平路径下不同探测条件中的大气透过率和太阳辐射参数进行计算和对比,进一步仿真分析其对背景噪声计数率的影响。研究发现,白天测距时,越接近正午时刻,背景噪声越小,越有利于探测;当探测高度高于3 km时可以基本摆脱地表能见度对背景噪声的影响,且探测高度越高,背景噪声越小;且在探测高度高,探测距离近的应用场景中,不可忽略目标背景辐射。本文可以为全天候不同探测条件下的单光子激光机载远程测距系统设计提供背景噪声水平的参考。

关键词:单光子激光测距;大气透过率;太阳辐射;背景噪声计数率;MODTRAN;CART

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.011

Influence of atmospheric transmission and background radiation in single-photon laser detection

MIAO Rui-qing¹, WANG Li-heng², XU Guang-ping¹, HAN Long¹,

XU Lian-wang¹, ZHAO Yu-hao¹, DING Hao-yu¹

(1. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China;

2. The Second Military Representative Office of the Army Equipment Department in Beijing, Beijing 100012, China)

Abstract: Single-photon laser ranging technology has gained widespread application across various ranging scenarios due to its high detection sensitivity. To investigate the impact of atmospheric transmission and background radiation parameters on the background noise at the 1064 nm wavelength under the single-photon detection regime, two atmospheric radiative transfer simulation tools, MODTRAN and CART, are used to calculate and compare the atmospheric transmittance and solar radiation parameters under different detection conditions along a horizontal path, and further simulate and analyze their impact on the background noise count rates. It is found that during daytime ranging, the closer to noon, the lower the background noise, which is more conducive to detection. Additionally, when the detection altitude exceeds 3 km, the influence of ground visibility on background noise is essentially negated, and the higher the detection altitude, the lower the background noise. Moreover, in scenarios with high detection altitude and short detection distance, target background radiation should not be neglected. This paper can provide a valuable reference for the background noise levels in the design of airborne single-photon laser long-range ranging systems, particularly under all-weather conditions and various detection scenarios.

Keywords: single-photon laser range; atmospheric transmittance; solar radiation; background noise count rates; MODTRAN; CART

1 引言

随着激光探测技术的迅速发展,单光子激光测距作为新兴方法,已广泛应用于激光成像、星载探测及地基太空碎片监测等多个前沿领域,并取得良好成效^[1]。单光子激光测距技术使用单光子探测器实现光子级别的探测灵敏度,极大提升了激光测距机的测程。但极高的灵敏度也使得单光子探测器非常容易响应大气背景噪声,尤其是在白天进行单光子激光测距时,背景噪声比夜晚要大 10^6 倍^[2]。而不同的探测条件、大气环境以及太阳的辐射特性均会影响激光回波中的信号与噪声强度。为了满足单光子激光测距机在机载远程测距条件下全时段、宽范围的使用需求,评估及预测不同使用条件下的单光子激光测距性能以指导测距系统设计,有必要精确计算分析背景辐射的变化和对背景噪声计数率的影响。

国外对背景辐射的研究较早,已经开发出如LOWTRAN、MODTRAN和FASCODE等多种成熟的计算软件^[3-6],其中MODTRAN由于具有较高的光谱分辨率和计算速度,在国际上应用广泛;中国科学院安徽光学精密机械研究所根据大量观测数据建立了我国不同地域下的大气参数模式,并开发了我国首款通用的大气辐射传输计算软件CART^[7],目前已更新至3.0版本。目前国内基于MODTRAN对背景辐射的仿真研究多集中于红外探测的应用^[8-11],对激光测距领域的背景辐射影响因素的研究还不够全面,这是由于传统激光测距多使用线性APD探测体制配合高功率激光器,背景辐射噪声可以通过阈值门限被快速滤除。而单光子探测单元响应输出的是0/1信号,触发就会输出无差别的饱和雪崩脉冲,难以区分,因此需要对不同探测条件下的背景噪声计数率变化进行定量研究,为单光子测距系统的降噪设计提供理论基础。

本文以单光子激光探测体制为基础,运用两种大气辐射传输仿真工具MODTRAN5.2.1和CART3.0对单光子探测模型中与大气相关的参数进行仿真和对比,进一步探究了在1064 nm波长处,水平路径下探测距离、探测高度、太阳天顶角等因素对背景噪声计数率的影响。为后续在1064 nm波段

处全天候、宽范围应用条件下的单光子激光机载远程测距研究提供了基础。

2 单光子激光探测背景噪声组成

白天进行激光测距时,进入探测器接收视场的背景光噪声主要由天空背景辐射和目标背景辐射两部分组成,其中,天空背景辐射主要来自太阳光的大气散射,同时大气自身还存在热辐射,但是在1064 nm波段热辐射影响较小,忽略不计;目标背景辐射是目标对太阳光的二次辐射。

天空背景辐射是构成背景噪声的主要部分。假定大气均匀且认为产生各向同性散射,太阳光大气散射的光谱辐射亮度为 L_λ ,根据太阳光的大气散射辐射亮度的定义和激光雷达方程,接收光学系统接收到的太阳大气散射光子数 N_{ns} 为^[12]:

$$N_{ns} = \frac{\pi^2}{16h\nu} T_r \theta_r^2 d_r^2 L_\lambda \Delta\lambda \quad (1)$$

式中, T_r 为接收光学系统透过率; θ_r 为接收系统平面角; d_r 为接收光学系统接收孔径直径; $\Delta\lambda$ 为滤波带宽; h 为普朗克常数; ν 为光子频率; $h\nu$ 为发射激光中单个光子的能量。

假设太阳光谱辐照度为 H_λ ,目标对太阳光的反射可以认为是一个二次辐射源,由目标二次辐射的太阳光经过大气衰减后进入探测器,根据扩展背景源的公式接收光学系统接收到目标反射的太阳辐射光子数 N_{nr} 为:

$$N_{nr} = \frac{\pi}{16h\nu} T_r \theta_s^2 d_r^2 \Delta\lambda \rho H_\lambda \cos\theta \cos\phi T_a \quad (2)$$

式中, ρ 为目标表面的反射率; θ 为光轴与目标表面法线的夹角; ϕ 为太阳与目标表面法线的夹角; T_a 为单程大气透过率; θ_s 为测距机接收到目标反射太阳光的平面角,当 $\theta_b \leq \theta_r$ 时, $\theta_s = \theta_b$,其中, θ_r 为测距机接收视场的平面角, θ_b 为目标对测距机的张角,近似为 $\theta_b = l/R$, l 为目标尺寸(取目标直径或最长边);当 $\theta_b > \theta_r$ 时, $\theta_s = \theta_r$ 。

则背景噪声光子总数 N_n 为:

$$N_n = N_{ns} + N_{nr} = \frac{\pi}{16h\nu} T_r \Delta\lambda d_r^2 (\theta_r^2 \pi L_\lambda + \theta_s^2 \rho H_\lambda \cos\theta \cos\phi T_a) \quad (3)$$

N_{ns} 、 N_{nr} 、 N_n 单位均为counts/s,是1064 nm波段每秒的背景噪声光计数。

3 大气参数仿真与分析

在单光子探测背景噪声公式中,主要有三个大气相关参数产生影响,分别是大气透过率 T_a 、太阳直射辐照度 H_λ 和太阳散射辐亮度 L_λ 。其中大气透过率代表了光在大气传输过程中的衰减情况;太阳直射辐照度间接反映目标背景辐射强度;太阳散射辐亮度代表天空背景噪声强度。所以当接收系统参数和目标特性参数及探测器与目标相对位置固定时,背景噪声计数率由大气透过率、太阳辐照度和太阳散射辐亮度共同决定。

本文研究在单光子测距机系统参数固定时,假设白天的不同时段在同一地区(大气模式和气溶胶类型不变)对距离不同、高度不同的目标进行水平测距,大气传输和背景辐射变化对背景噪声计数率的影响。同时考虑到除了距离和高度,地表能见度和太阳天顶角变化也会引起大气组成和太阳辐射强度变化,故针对多个因素使用 MODTRAN 和 CART 进行仿真,以确定仿真结果的正确性并计算相同参数设置下两款软件的仿真误差。

3.1 大气透过率

激光探测系统以大气为传输信道,光束在大气中传输时受到气体分子和气溶胶颗粒分子等的吸收或散射而衰减,大气透过率表征光在大气中传播的衰减程度,与传输路径中的大气分布和气溶胶特性密切相关。分别在 MODTRAN 和 CART 中设置大气模式为中纬度夏季,气溶胶类型为乡村类型,无云或雨,计算水平路径下 1064 nm 波长处的大气透过率。再分别改变探测距离、探测测高度和地表能见度,仿真得出三组大气透过率数据,每组数据均包括 MODTRAN 和 CART 两个软件的仿真结果。图 1 为透过率随探测距离的变化关系,其中探测高度设置为 5 km,距离变化范围为 0 ~ 200 km;图 2 为透过率随探测高度的变化关系,其中探测距离为 50 km,高度变化范围为 0 ~ 15 km;图 3 为不同探测高度下透过率随能见度的变化关系,其中探测距离设为 20 km,能见度变化范围为 0 ~ 30 km,探测高度分别设为 0 km、1 km、2 km、3 km、5 km,图 3 (a) 为 MODTRAN 的仿真结果,图 3 (b) 为 CART 的仿真结果。

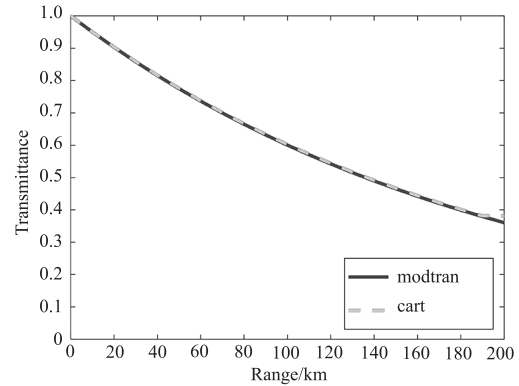


图 1 大气透过率随探测距离的变化

Fig. 1 Variation of atmospheric transmittance with detection distance

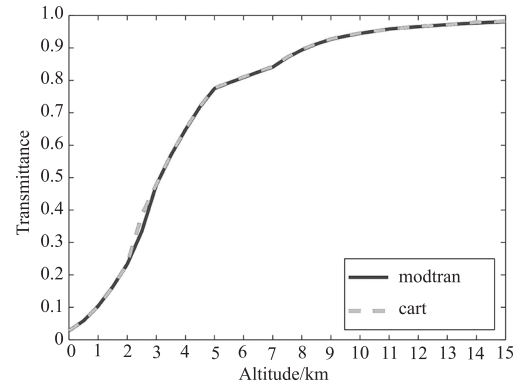
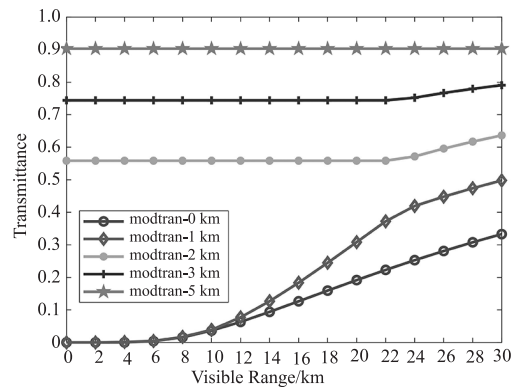
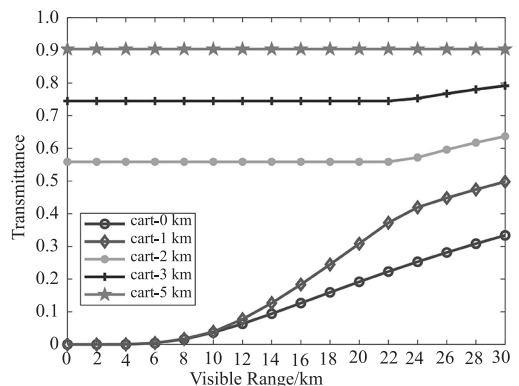


图 2 大气透过率随探测高度的变化

Fig. 2 Variation of atmospheric transmittance with detection altitude



(a) MODTRAN 计算结果



(b) CART 计算结果

图 3 不同探测高度下大气透过率随能见度的变化

Fig. 3 Variation of atmospheric transmittance with visibility at different detection altitudes

由图 1 和图 2 可知,在水平观测时,大气透过率随着探测距离的增大而呈负指数趋势减小,随着探测高度的增大而增大。由图 3 可知,当探测高度小于 2 km 时,大气透过率均随能见度的增大而增大;当观测高度大于等于 2 km 时,透过率基本不随能见度变化。主要原因是在 MODTRAN 和 CART 中能见度的定义均为地表能见度,这个值主要反映 2 km 以下的大气层中气体分子及气溶胶微粒的情况,所以随着高度的增加,大气透过率趋于一个稳定值。在本部分关于水平路径大气透过率的计算中,MODTRAN 和 CART 计算的平均相对误差约为 0.48 %。

3.2 太阳辐照度

太阳辐照度和太阳散射辐亮度都是表征太阳辐射强度的参数,影响太阳辐射特性的因素主要有太阳的位置信息、观测时的气象条件等。分别在 MODTRAN 和 CART 中设置大气模式为中纬度夏季,气溶胶类型为乡村类型,无云或雨,计算 1064 nm 波长处的太阳辐照度,这种计算模式的路径默认为大气层顶部(标准模式下高度为 100 km)开始或结束的路径,并且只与观测高度有关,与观测点和目标之间的路径无关。仿真太阳辐照度时同样需要考虑观测点与太阳的相对位置,故改变太阳天顶角、观测高度和地表能见度,仿真得出三组太阳辐照度数据,每组数据均包括 MODTRAN 和 CART 两个软件的仿真结果。图 4 为辐照度随太阳天顶角的变化关系,图 5 为辐照度随观测高度的变化关系,图 6 为不同探观测高度下辐照度随能见度的变化关系,其中图 6(a)为 MODTRAN 的仿真结果,图 6(b)为 CART 的仿真结果。

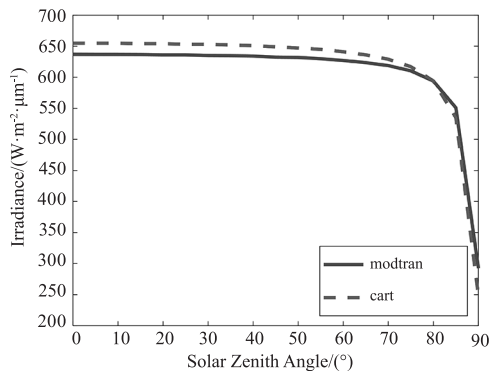


图 4 太阳辐照度随太阳天顶角的变化

Fig.4 Variation of solar irradiance with solar zenith angle

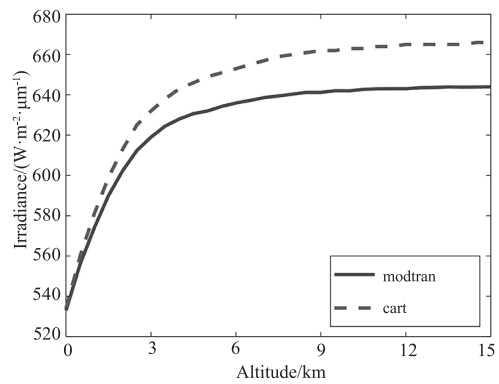
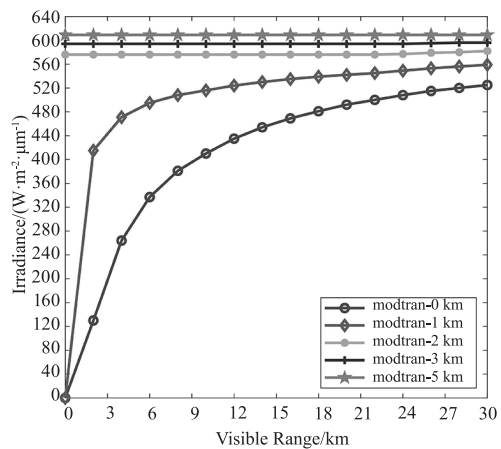
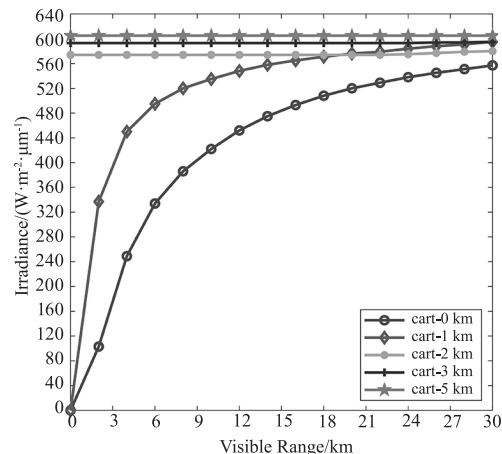


图 5 太阳辐照度随探测高度的变化

Fig.5 Variation of solar irradiance with detection altitude



(a) MODTRAN 计算结果



(b) CART 计算结果

图 6 不同探探测高度下太阳辐照度随能见度的变化

Fig.6 The variation of solar irradiance with visibility at different detection altitudes

图 4 展示了当观测高度为 5 km,太阳天顶角在 0~90°范围内变化的太阳辐照度。分析可知,随着太阳天顶角的增大,太阳辐照度值缓慢减小;当太阳天顶角接近 90°时快速衰减,此时太阳光线接近水平传输,每束光线对应的辐射面积很大,最终单位面

积单位时间内接收到的太阳辐射能量很小。

图5展示了在其他参数不变的情况下,固定太阳天顶角为 11.16° (夏至日的正午太阳天顶角度数),计算观测高度为 $0\sim 15\text{ km}$ 的太阳辐照度的结果。当观测高度在 $0\sim 5\text{ km}$ 时,辐照度随观测高度的增大而显著增大,而后曲线变化趋于平缓。这说明当激光测距系统的应用场景为低空或近地面时,才需要考虑因高度变化引起的太阳辐照度以及噪声变化。

图6展示了在其他参数不变的情况下,分别在观测高度为 0 km 、 1 km 、 2 km 、 3 km 和 5 km 时,计算地表能见度为 $0\sim 30\text{ km}$ 的太阳辐照度结果。结论与大气透过率相似,当观测高度小于 2 km 时,太阳辐照度随地表能见度的增大而增大;当观测高度大于等于 2 km 时,太阳辐照度基本不随能见度变化。对比MODTRAN和CART的计算结果可以发现,MODTRAN和CART的太阳辐照度计算结果趋势基本一致,平均相对误差为 3.17% 。

3.3 太阳散射辐亮度

由于MODTRAN和CART在仿真太阳散射辐亮度的时使用不同的数学模型,参数设置存在差异,不适合控制单一变量进行计算结果的对比,故本部分内容仅展示MODTRAN的计算结果。仿真中设置为倾斜路径,草地反照率,乡村气溶胶,能见度 23 km ,路径天顶角 90° ,一年中的第200天,观测高度 5 km ,太阳天顶角为 11.16° (夏至日的正午太阳天顶角度数)。仿真后读取 1064 nm 处的计算结果,再通过改变太阳天顶角、探测距离和探测高度,得到太阳散射辐亮度与不同变量的关系。

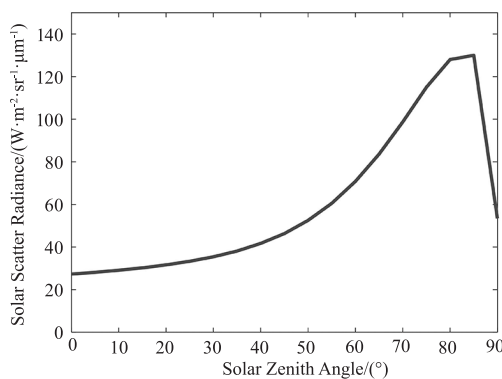


图7 太阳散射辐亮度随太阳天顶角的变化

Fig. 7 Variation of solar scattering radiance with solar zenith angle

图7展示了当观测高度为 5 km ,探测距离为 200 km ,太阳天顶角在 $0\sim 90^\circ$ 范围内变化时的太阳散射辐亮度。分析可知,随着太阳天顶角的增大,太

阳散射辐亮度值逐渐增大,约在 85° 的位置达到最大值 $129.915\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$,随后快速减小。这是因为太阳天顶角增大后,太阳光线穿过的大气层厚度增大,受到微粒的散射作用也随之增大,而当太阳天顶角在 $85^\circ\sim 90^\circ$ 时,太阳高度角只有不足 5° ,太阳光强度很弱,故太阳散射辐亮度大幅减小。

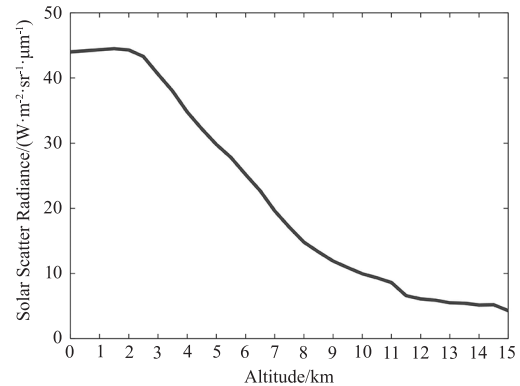


图8 太阳散射辐亮度随探测高度的变化

Fig. 8 Variation of solar scattering radiance with detection altitudes

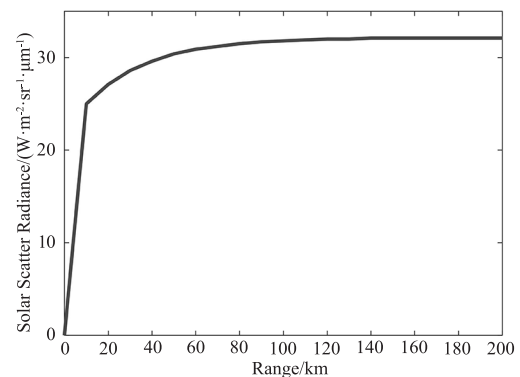


图9 太阳散射辐亮度随探测距离的变化

Fig. 9 Variation of solar scattering radiance with detection distance

图8展示了在其他参数不变的情况下,固定太阳天顶角为 11.16° ,探测距离为 50 km ,计算观测高度为 $0\sim 15\text{ km}$ 的太阳散射辐亮度的结果。分析可知,在 $0\sim 2\text{ km}$ 处,太阳散射最强,之后太阳散射辐亮度随观测高度的增大而减小。这是因为近地面的大气成分复杂,大量微粒对太阳光进行各个方向的散射,故太阳散射辐亮度偏大。随着高度上升,高空中的大气变稀薄,对太阳光的散射作用随之减小。

图9展示了固定观测高度为 5 km ,太阳天顶角为 11.16° ,计算探测距离为 $0\sim 200\text{ km}$ 的太阳散射辐亮度的结果。可以发现,太阳散射辐亮度值随着探测距离的增大而增大,在超过 50 km 后变化趋于平缓,距离 200 km 处相较于距离 50 km 处增幅仅

1.7 W/(m² · sr · μm), 所以在此范围内对远程目标进行水平探测时, 可以基本忽略因距离变化带来的太阳散射辐亮度变化。

4 对背景噪声计数率的影响

通常当测距系统参数固定后, 系统的测距能力也随之确定, 而在实际测距中, 背景噪声的强弱将会直接影响测距能力, 而背景噪声与大气环境密切相关。假设白天在同一地区(大气模式和气溶胶类型不变)、不同时间(太阳天顶角变化)对距离不同、高度不同的低反射率小目标进行水平测距时, 大气环境均不相同, 此时太阳散射辐亮度、太阳辐照度和大气透过率的变化会对背景噪声计数率带来较大影响。基于公式(1)~(3), 代入表1的系统参数以及使用MODTRAN对大气透过率 T_a 、太阳辐照度 H_λ 、太阳散射辐亮度 L_λ 的仿真结果, 分别研究了天空背景辐射噪声计数率 N_{ns} 、目标背景辐射噪声计数率 N_{nr} 及总背景噪声计数率 N_n 与太阳天顶角、探测高度、探测距离参数的关系。

表1 背景噪声计数率仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of background noise count rate

noise count rate		
输入参数	符号	参数值
接收系统透过率	T_r	0.6
接收视场角	θ_r	0.3 mrad
接收光学系统接收孔径直径	d_r	46 mm
滤波带宽	$\Delta\lambda$	0.25 nm
光轴与目标表面法线的夹角	θ	0°
太阳与目标表面法线的夹角	ϕ	随太阳天顶角变化
目标表面反射率	ρ	0.2
目标尺寸	l	20 m
目标对测距机的张角	θ_b	l/R

4.1 太阳天顶角

图10展示了天空背景辐射噪声计数率 N_{ns} 、目标背景辐射噪声计数率 N_{nr} 及总背景噪声计数率 N_n 随太阳天顶角变化的曲线。

随着太阳天顶角增大, 随着太阳天顶角的增大, N_n 逐渐增大, 约在85°的位置达到最大值随后快速减小。在实际应用时, 正午太阳天顶角偏小, 日落时太阳天顶角会显著增大, 此时背景噪声计数率约为正午时分的5~6倍, 可能会对测距性能造成较大影响。

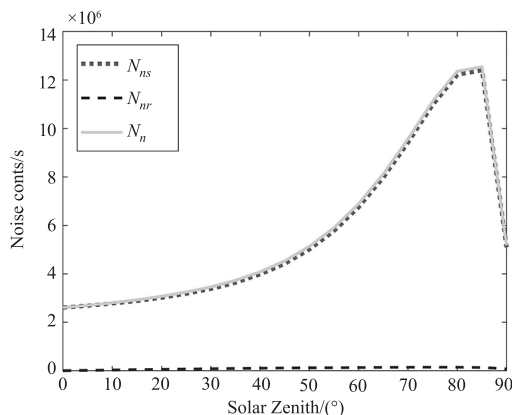


图10 背景噪声计数率随太阳天顶角的变化

Fig. 10 Variation of background noise count rate with solar zenith angle

4.2 探测高度

图11展示了天空背景辐射噪声计数率 N_{ns} 、目标背景辐射噪声计数率 N_{nr} 及总背景噪声计数率 N_n 随探测高度变化的曲线。

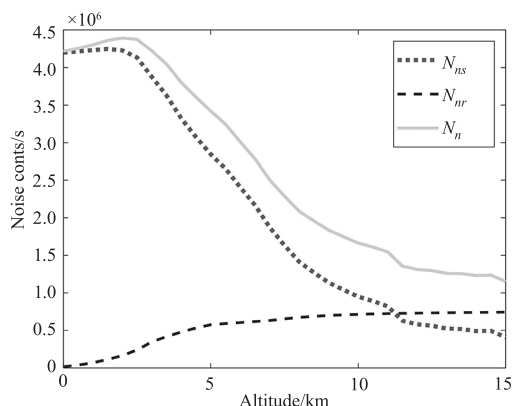


图11 背景噪声计数率随探测高度的变化

Fig. 11 Variation of background noise count rate with detection altitudes

由图11可知, N_{ns} 随探测高度的增大而减小, 而 N_{nr} 随探测高度的增加而增大, 二者在高度11.26 km处相交, 此时噪声计数率约为725000 counts/s, 此后随高程增加, N_{nr} 大于 N_{ns} , 这说明在近地面测距时可以忽略目标背景辐射的影响, 在高空不可忽略。 N_n 随探测高度的增大先微微增大, 再逐渐减小, 在高程2.3 km处达到最大值约 4.4×10^6 counts/s。

4.3 探测距离

图12展示了天空背景辐射噪声计数率 N_{ns} 、目标背景辐射噪声计数率 N_{nr} 及总背景噪声计数率 N_n 随探测距离变化的曲线。

由图12可知, N_{ns} 随探测距离的增大而增大, N_{nr} 随探测距离的增大而减小, N_n 随探测距离的增大先增大再减小, 在距离60 km处达到最大值约

3.5×10^6 counts/s。

根据仿真结果,太阳天顶角越小,即越接近正午时刻,总背景噪声越小,越有利于探测;在探测高度高,探测距离近的应用场景中,不可忽略目标背景辐射。

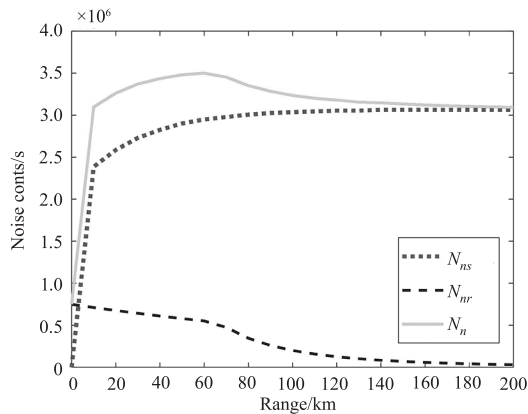


图 12 背景噪声计数率随探测距离的变化

Fig. 12 Variation of background noise count rate with detection distance

5 结 论

本文以单光子激光测距背景噪声公式为基础,运用两种大气传输仿真工具 MODTRAN 和 CART 对公式中与大气相关的参数进行仿真和对比,分别探究了在水平路径下探测距离、探测高度、地表能见度或太阳天顶角对大气透过率、太阳散射辐亮度和太阳辐照度的影响,并进一步研究了在水平路径下,探测低反射率小目标时,探测距离、探测高度和太阳天顶角对天空背景噪声、目标背景辐射噪声和总背景噪声计数率的影响,得到以下结论:

1) 当太阳天顶角小于 75° 时,总背景噪声计数率随太阳天顶角的增大而增大。则越接近正午时刻,越有利于探测,日落时背景噪声计数率约为正午时分的 5~6 倍。

2) 在 0~15 km 高程内,当探测高度高于 3 km 时可以基本摆脱地表能见度对背景噪声的影响,并且探测高度越高,总背景噪声越小,越有利于对目标的探测。

3) 探测距离的增大造成天空背景噪声增大,目标背景辐射噪声减小,总背景噪声先增大后减小。

4) 研究过程中发现,MODTRAN 和 CART 在中纬度夏季模式下,水平路径的大气透过率计算结果基本一致;太阳辐照度的计算结果趋势相同,平均相对误差为 3.17%;太阳散射辐亮度由于两款软件计算模型不同,参数设置上略有差异,不便于对计算结

果进行一致性对比。总体上两个软件在计算精度上差异较小,使用中 CART 的设置更加简捷,并且还具我国西北、沿海和大陆地区逐月的大气模式,对于分析国内特定地区的大气特性提供了更准确的数据库;而 MODTRAN 的参数设置更加精细,具有更多种类的数学模型可以选用。

本文所仿真分析的不同使用条件下的背景辐射参数及背景噪声变化情况可以为 1064 nm 波段处全天候、宽范围应用条件下的单光子激光探测系统的降噪设计提供参考。

参考文献:

- [1] Shao Yu, Wang Dejiang, Zhang Di, et al. Research progress of single photon laser ranging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 258-266. (in Chinese)
邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 258-266.
- [2] Wang Nan, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Daytime background noise analysis and application research in 1064 nm band [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(10): 1190-1194. (in Chinese)
王楠, 邓华荣, 张海峰, 等. 1064 nm 波段白天背景噪声分析及应用研究 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(10): 1190-1194.
- [3] Kneizys F X. Users guide to LOWTRAN 7 [R]. *Air Force Geophys*, 1988: 1-4.
- [4] Anderson G P, Berk A, Acharya P K, et al. MODTRAN4.0 User's Manual [M]. *Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command Hanscom AFB MA*, 1997: 01731-3010.
- [5] Isaacs R G, Wang W C, Worsham R D, Goldenberg S. Multiple scattering LOWTRAN and FASCOD models. [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(7): 1272-1281.
- [6] Griffioen E, Oikarinen L. LIMBTRAN: a pseudo three-dimensional radiative transfer model for the limb-viewing imager OSIRIS on the ODIN satellite [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105(D24): 29717-29730.
- [7] Wei Heli, Dai Congming, Wu Pengfei, et al. An upgraded combined atmospheric radiative transfer CART2 (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201024. (in Chinese)
魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 更新升级的通用大气辐

- 射传输软件 CART2 (特约) [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7):20201024.
- [8] Shi Jie, Shi Bo, Jin Feng, et al. The study of characteristics and imaging of infrared radiation of middle and upper atmosphere background [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(8):0828005. (in Chinese)
施杰, 史波, 金峰, 等. 中高层大气背景红外辐射特性及成像研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(8):0828005.
- [9] Zhang Fang, QiLinlin, Li, Ji Wei, et al. Influence of atmosphere in different areas on middle-far infrared radiation transmission [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4):0401002. (in Chinese)
张芳, 齐琳琳, 吉薇, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(4):0401002.
- [10] Wang Wenhui, Wang Gao, Zhang Meng. Study on influence factors of atmospheric transmittance of infrared radiation [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3):308-312. (in Chinese)
王文慧, 王高, 张猛. 红外辐射大气透过率影响因素的研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(3):308-312.
- [11] Wang Yali. Infrared detection imaging performance derivation method in complex atmospheric environment [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
王亚莉. 复杂大气环境下红外探测成像性能推演方法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [12] Ma Pengge, Yang Yi. Multi-pulse laser ranging radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
马鹏阁, 羊毅. 多脉冲激光雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.