



单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

胡蕴航 王灵杰 刘洋 王连强 周

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

HU Yunhang, WANG Lingjie, LIU Yang, WANG Lianqiang, ZHOU Di

引用本文:

胡蕴航, 王灵杰, 刘洋, 等. 单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 194–201. DOI: 10.5768/JAO202546.0107001

HU Yunhang, WANG Lingjie, LIU Yang, et al. Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(1): 194–201. DOI: 10.5768/JAO202546.0107001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究](#)

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

[旋转物体的单光子三维重建技术](#)

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

应用光学. 2024, 45(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501001>

[激光主动探测拼接光学系统的装调设计](#)

Alignment design of assembly optical system for laser active detection

应用光学. 2020, 41(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501001>

[基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究](#)

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

[高信噪比多波长2 μm主动锁模光纤激光器](#)

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

[太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术](#)

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

应用光学. 2023, 44(5): 1068–1072 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0194-08

引用格式: 胡蕴航, 王灵杰, 刘洋, 等. 单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 194-201.

HU Yunhang, WANG Lingjie, LIU Yang, et al. Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 194-201.



在线阅读

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

胡蕴航^{1,2,3,4}, 王灵杰^{1,3,4}, 刘 洋^{1,2,3,4}, 王连强^{1,3,4}, 周 頤^{1,3,4}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033; 4. 光学系统先进制造重点实验室(中国科学院), 吉林长春 130033)

摘要: 使用单光子激光雷达进行远距离探测可以提高最远探测距离, 由于其传输链路比较复杂, 因此建立了单光子激光主动探测信噪比数学模型。首先, 建立了脉冲激光在主动探测链路中发生衍射效应下的回波信号模型, 计算了单光子探测器接收到的信号光子数大小; 而后, 分析了主动探测过程中噪声光电子的组成, 定量计算了噪声光电子数。基于上述模型, 建立了考虑视轴瞄准偏差下的回波信噪比模型。通过一套用于理论模型验证的单光子激光探测系统的系统参数进行仿真, 分析了不同目标探测距离与不同接收系统口径大小下的激光脉冲能量与回波信噪比大小之间的关系, 并将其与以激光雷达方程为基础建立的回波信噪比模型计算出来的结果进行比较, 证明了该数学模型简单可行。

关键词: 单光子激光雷达; 主动探测; 信噪比; 探测距离; 数学模型

中图分类号: TN216

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0107001](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001)

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

HU Yunhang^{1,2,3,4}, WANG Lingjie^{1,3,4}, LIU Yang^{1,2,3,4}, WANG Lianqiang^{1,3,4}, ZHOU Di^{1,3,4}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China; 4. Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Long-range detection using single-photon lidar can increase the farthest detection distance, and due to the complexity of its transmission link, a mathematical model of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection was established. Firstly, the echo signal model of the pulsed laser in the full link of active detection considering diffraction was established, and the size of the number of signal photons received by the single-photon detector was calculated. Then, the composition of noisy photoelectrons in the active detection process was analyzed, and the number of noisy photoelectrons was quantitatively calculated. Based on the above model, the echo signal-to-noise ratio model under the consideration of the aiming deviation of the optic axis was established. A set of system parameters of a single-photon laser detection system used for theoretical model validation was simulated and analyzed, and the relationship between the laser pulse energy and the size of the echo signal-to-noise ratio was analyzed under the influence of different target detection distances and

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 民用航天项目 (D010206)

作者简介: 胡蕴航 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子计数激光雷达探测技术研究。E-mail: huyunhangjl@163.com

通信作者: 刘洋 (1989—), 男, 工程师, 主要从事光学系统设计与杂散光抑制设计。E-mail: liuyang_08_22@163.com

different aperture sizes of the receiving system. The results were compared with those calculated by the echo signal-to-noise ratio model based on the lidar equation, which proved the simplicity and feasibility of the mathematical model.

Key words: single-photon lidar; active detection; signal-to-noise ratio; detection range; mathematical model

引言

单光子激光雷达使用单光子探测器来接收回波信号, 可以对非常微弱的回波信号进行响应, 因此可以大大延长最远探测距离, 广泛应用在卫星测距^[1]与机载激光通信^[2]中。然而在实际探测过程中, 脉冲信号光子受到自身光斑衍射、大气湍流等影响, 回波光子数量极少, 且单光子探测器也会接收到噪声光电子, 导致回波信号的质量显著降低。当噪声计数率达到探测器的饱和计数率时, 探测系统会完全失去探测能力^[3], 会对模拟计数的测量结果产生极大影响, 使系统的灵敏度下降^[4]。而使用大能量的脉冲激光器与高探测效率的单光子探测器作为主动探测系统的组成部分, 其能耗较大, 会导致资源浪费。所以了解单光子激光探测过程中, 激光发射脉冲能量与回波信噪比大小之间的关系尤为重要。

国内外许多学者与研究人员对单光子激光主动探测过程进行了深入地研究, 针对探测过程提出并改进了多种数学模型。长春光机所、上海技物所、上海光机所的研究人员分别设计了一款单光子激光雷达系统并用其开展测距验证实验, 实现了对一定距离目标的探测, 得到了测距结果^[5-7]。美国 NASA 与南京理工大学的研究人员分别针对太阳背景辐射噪声建立数学模型, 并对建立的数学模型进行分析^[8-9]。浙江大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所等研究人员主要在大气探测单光子激光雷达方面进行研究, 并获得了多项研究成果^[10-12]。南京大学、中国科学院深圳先进技术研究院等研究机构分别以信噪比为基础, 建立了多种数学模型^[13-14]。还有许多高校与科研单位针对激光雷达系统或激光主动探测过程进行了各种各样的仿真模拟或实验验证^[15-18]。

目前, 国内外许多科研机构与研究学者对单光子激光主动探测全链路的研究主要集中在考虑外部杂散光背景辐射噪声、大气效应、回波信号光电子分布上。包括计算外部背景辐射噪声光电子数, 建立大气瑞利散射模型、大气湍流模型, 计算不同目标特性下的探测概率等。然而, 大部分研究学者都没有考虑到信号在传输过程中会发生衰

减的因素。如脉冲激光在传播过程中会发生衍射, 其对于回波信号的影响很大。随着极限探测距离需求的发展与单光子激光主动探测技术的进步, 噪声对于激光主动探测距离的影响很有限, 而考虑衍射对单光子激光最远主动探测距离的影响很有意义。本文首先建立了脉冲激光在主动探测过程中发生衍射情况下的回波信号模型, 同时又分析了激光主动探测过程中的主要噪声来源, 定量计算了噪声平均光电子数大小。并通过一套用于理论模型验证的单光子激光主动探测系统的系统参数进行验证与分析, 模拟了不同目标探测距离与不同接收口径下的激光脉冲能量与回波信噪比大小的关系, 并与以激光雷达方程为基础建立的回波信噪比模型的计算结果进行比较。

1 模型建立

针对单光子探测器可以对单个光子进行响应的特点, 其回波信噪比的计算方法可使用一定时间内单光子探测器接收到的信号光子数与噪声光子数的比率来表示:

$$R_{SN} = \frac{\bar{n}_{signal}}{\bar{n}_{noise}} \quad (1)$$

式中: R_{SN} 为单光子探测器的回波信噪比; \bar{n}_{signal} 为开环时间一定的情况下单光子探测器接收到的平均信号光子数; \bar{n}_{noise} 为开环时间一定的情况下单光子探测器接收到的平均噪声光电子数。

1.1 回波信号模型建立

单光子激光主动探测过程如图 1 所示。脉冲激光器发射光子, 经过发射光学系统进行准直与

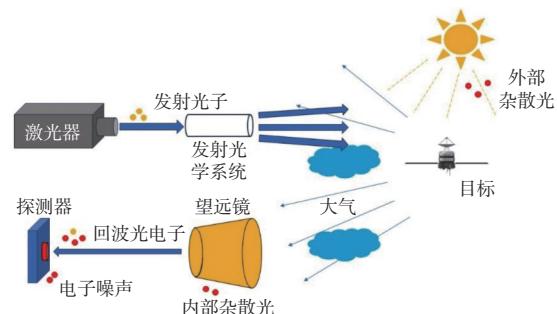


图 1 单光子激光主动探测过程

Fig. 1 Single-photon laser active detection process

扩束并在大气中传播, 在传播过程中发生衍射并受到大气湍流的影响, 到达被探测目标表面并发生漫反射, 漫反射后的回波信号光子被接收光学系统接收, 最终被单光子探测器响应。

假设探测距离为 R , 则发射脉冲激光电场强度分布表达式为

$$U_0(x, y) = U \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_t^2}\right) \quad (2)$$

式中 U 为发射激光的电场强度, 单位为 N/C, $U = \sqrt{\frac{I}{\alpha}}$, I 为激光光强, 单位为坎德拉, $\alpha = \frac{n}{2\mu_0 c}$ 为比例系数^[19]。在比例系数中, n 为折射率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空中的磁导率, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为光速。对于脉冲激光器, 其发射光强^[20] 为

$$I = \frac{2E_t f_{\text{rep}}}{\pi \omega_t^2} \tau_t \tau_a \quad (3)$$

式中: E_t 为发射激光的脉冲能量, 单位为 J; f_{rep} 为脉冲激光器的重频, 单位为 Hz; τ_t 为发射光学系统透过率; τ_a 为大气透过率; ω_t 为考虑大气湍流影响下的激光光斑大小, 其表达式为^[20]

$$\omega_t = R \sqrt{\left(\frac{\beta \lambda}{\pi \omega_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi (r_0/2)}\right)^2} \quad (4)$$

式(4)为考虑大气湍流影响下的激光光斑半径计算公式, 其中 β 为激光光束质量因子, 可通过实验测得; λ 为激光波长; $\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \varphi}$ 为激光光束束腰半径; φ 为激光发散角; r_0 为大气相干长度。

发射激光在空间中传播时满足菲涅尔衍射, 采用二维傅里叶变换来模拟^[21-22]:

$$U_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[U_0(x, y)]\mathcal{F}[h(x, y)]\} \quad (5)$$

式中: $U_1(x, y)$ 为发射脉冲激光通过一个相位屏之后的电场强度分布; $h(x, y)$ 为脉冲响应函数, 其一般形式为^[21-22]

$$h(x, y) = \frac{\exp(i k R)}{i \lambda R} \exp\left[i k \frac{(x^2 + y^2)}{2R}\right] \quad (6)$$

式中 k 为波数。

激光在空间中传播会受到大气湍流的影响, 采用多相位屏法来模拟这一影响过程^[20]。将大气传输链路看成为一系列厚度为 ΔR 的相位屏, 光波每传输到一个相位屏, 就把对应的相位叠加在光波前, 然后继续传输至下一个相位屏, 直至被探测目标表面, 如图 2 所示。

激光到达被探测目标表面时, 会经过 n 个厚度为 ΔR 的相位屏, 将此时的电场强度分布记为 $U_n(x, y)$,

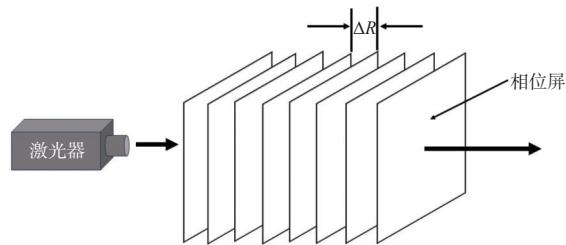


图 2 多相位屏传输示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-phase screen transmission

此时的光强分布为 $I_n(x, y) = \alpha U_n^2(x, y)$ 。脉冲激光到达被探测目标表面会发生散射, 使用双向反射分布函数(BRDF)来描述目标表面的光学散射特性。若将被探测目标看成朗伯辐射体, 其 BRDF 的计算方法为

$$f_r = \frac{\rho}{\pi} \quad (7)$$

式中 ρ 为目标表面的反射率。

根据双向反射分布函数^[23]的定义式:

$$f_r = \frac{dL_r}{dE_i} \quad (8)$$

式中: dL_r 为面元的反射光辐亮度; dE_i 为面元上的辐照度。

则被探测目标表面发生散射后的散射光辐亮度分布 $L'_n(x, y)$ 为

$$L'_n(x, y) = f_r I_n(x, y) \quad (9)$$

根据辐射度学定义, 从被探测目标表面上发生散射的散射光的辐射通量计算方法为

$$P'_n(x, y) = L'_n(x, y) dA \cos \theta_{\text{tar}} \pi \quad (10)$$

式中: $P'_n(x, y)$ 为从目标发生散射后的散射光的辐射通量大小, 即辐射功率大小; dA 为接收系统面元大小; θ_{tar} 为激光出射方向与被探测目标表面法向夹角。

则接收系统接收到的回波信号的功率分布 $P'_{n_2}(x, y)$ 为^[20]

$$P'_{n_2}(x, y) = P'_n(x, y) \pi \theta_r \tau_a \tau_r \eta_r t \quad (11)$$

式中: θ_r 为接收系统的视场角; τ_r 为接收光学系统透过率; η_r 为单光子探测器的探测效率。

将接收系统接收到的回波信号的功率分布转换为能量分布 $E'_{t_2}(x, y)$:

$$E'_{t_2}(x, y) = P'_{n_2}(x, y) t_j \quad (12)$$

式中 t_j 为开环时间内单光子探测器接收光子时间之和, 即积分时间之和。

针对单光子探测器的工作特性, 其在一个开环时间内可以工作若干次, 在死时间段内接收不到光子, 在积分时间内可以接收到 1 个光子, 即积分时间-死时间-积分时间-死时间来回循环, 如图 3 所示。

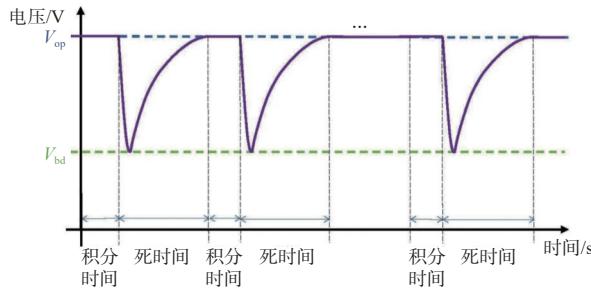


图 3 单光子探测器接收光子原理

Fig. 3 Schematic diagram of photon reception by single-photon detector

在一个开环时间内的积分时间之和的计算方法为

$$t_j = \frac{t_{\text{open}}}{t_d + t_{\text{int}}} t_p \quad (13)$$

式中: t_{open} 为单光子激光探测的开环时间; t_d 为单光子探测器的死时间; t_{int} 为单光子探测器的响应时间; t_p 为脉冲激光器的脉宽。

回波信号光子最后被单光子探测器响应。则单光子探测器接收到的平均信号光子数的表达式为

$$\overline{n}_{\text{signal}} = \frac{E_{t_2} \lambda}{hc} = \frac{\int E_{t_2}(x, y) ds \lambda}{hc} = \frac{\sum E_{ij} \lambda}{hc} \quad (14)$$

式中: 回波信号光子数主要计算的是探测器的感光面可以接收到的回波信号光子数, 所以积分区域为探测器的感光面; $h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数。

1.2 噪声模型建立

影响单光子激光主动探测的主要噪声来源如图 4 所示。



图 4 单光子激光主动探测过程中的主要噪声来源

Fig. 4 Main sources of noise during active detection process of single-photon lasers

太阳杂光光子为噪声来源的主要因素之一。电子噪声主要由单光子探测器在响应接收到的光子时产生, 其产生的噪声也会干扰回波信号的接收与后续处理。

1) 太阳杂光光子

由太阳自身发出的杂光到达激光雷达接收系统是噪声来源的主要因素之一。激光雷达探测视场内由太阳杂光产生的平均光子数的计算表达式如下:

$$\overline{n}_{\text{rad}} = \frac{\eta_r \lambda}{hc} \tau_r N_\lambda \Delta \lambda \theta_r A_r \tau_a T_{\text{sp}} \quad (15)$$

式中: $\overline{n}_{\text{rad}}$ 为太阳杂光光子的平均光子数大小; A_r 为望远镜的人瞳面积; N_λ 为太阳光光谱辐照度; $\Delta \lambda$ 为接收光学系统的滤光片带宽; T_{sp} 为系统外部杂光的点源透射比, 一般来讲, 接收光学系统的点源透射比的大小一般能达到 10^{-9} 的水平^[24]。

其中, N_λ 为太阳光照射到光学系统上的辐照度, 若将太阳看作朗伯辐射体, 其计算表达式为

$$N_\lambda = \frac{M_e a_{\text{sun}}^2 \cos \theta_{\text{sun}}}{R_{\text{sun}}^2} \quad (16)$$

式中: M_e 为太阳的辐射度; a_{sun} 为太阳半径; θ_{sun} 为太阳光与接收系统光轴夹角; R_{sun} 为太阳与探测系统之间的距离。太阳的辐射度使用普朗克公式^[25]进行计算:

$$M_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda \quad (17)$$

式中: C_1 、 C_2 为常数, $C_1 = 3.741\ 8 \times 10^8\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$, $C_2 = 143\ 88\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$; T 为黑体色温, 一般来说, 太阳的黑体色温为 5 900 K。

2) 散粒噪声

散粒噪声的产生是由于电磁波的量化引起的, 其量化现象通常发生在微波频率, 此波长下光子的到达率会发生微小的变化^[26]。单光子探测器的散粒噪声满足高斯分布, 接收到的散粒噪声电子数大小 $\overline{n}_{\text{shot}}$ 为

$$\overline{n}_{\text{shot}} = \sqrt{\overline{n}_{\text{signal}}} \quad (18)$$

3) 暗电流噪声

单光子探测器的暗电流噪声是指在没有外界光源刺激的情况下, 探测器本身产生的电流噪声。这种噪声是由于材料缺陷、温度波动、电路中的电子器件等因素引起的。暗电流会影响单光子探测器的性能与灵敏度, 并增加探测器的暗记数率。

已知暗电流密度, 则单位时间内暗电流产生的

噪声电子数的表达式为

$$\overline{n_{\text{dark}}} = \frac{J_{\text{dc}} A_{\text{opt}}}{e} t_{\text{int}} = R_{\text{DC}} t_{\text{j}} \quad (19)$$

式中： $\overline{n_{\text{dark}}}$ 为暗电流噪声电子数大小； $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{C}$ 为电子电荷数； J_{dc} 为暗电流密度； A_{opt} 为单光子探测器感光面积； R_{DC} 为单光子探测器的暗记数率。

4) 热噪声

热噪声，也称为约翰逊或奈奎斯特噪声，是由导体内电荷载流子的热效应产生的。由热噪声产生的电流大小 $\langle i_{\text{th}}^2 \rangle$ 通常由式(20)给出^[26]：

$$\langle i_{\text{th}}^2 \rangle = \frac{4k_b T_{\text{det}} \Delta \lambda}{R_{\text{L}}} \quad (20)$$

式中： $k_b = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 为玻尔兹曼常数； T_{det} 为探测器工作温度； R_{L} 为负载电阻大小。

则热噪声电子数大小 $\overline{n_{\text{th}}}$ 的计算表达式如下：

$$\overline{n_{\text{th}}} = \frac{4k_b T_{\text{det}} \Delta \lambda}{R_{\text{L}} e} t_{\text{j}} \quad (21)$$

更高的单光子探测器工作温度也会产生更多的热噪声。

5) 1/f噪声

1/f噪声又称闪烁或低频噪声，主要是由于光敏层的微粒不均匀或存在不必要的微量杂质，当电流流过时在微粒间发生微火花放电而引起的。它主要出现在1 kHz以下的低频区域。

$$\overline{n_{1/f}} = k_1 \frac{\left(G^2 f \frac{\eta_e}{h\nu} P_r \right)^b \Delta \lambda \lambda}{e c} \quad (22)$$

式中： $\overline{n_{1/f}}$ 为1/f噪声电子数大小； P_r 为回波信号功率大小； G 为前置放大器增益； f 为1/f噪声因子； k_1 为与元件制作工艺、材料尺寸、表面状态等有关的比例系数，取 $k_1 = 0.5$ ； b 为系数，一般来讲， $b = 2$ 。

综上所述，由上述因素产生的总噪声平均光电子数大小的计算方法为

$$\overline{n_{\text{noise}}} = \overline{n_{\text{rad}}} + \overline{n_{\text{shot}}} + \overline{n_{\text{dark}}} + \overline{n_{\text{th}}} + \overline{n_{1/f}} \quad (23)$$

1.3 视轴瞄准偏差模型建立

在单光子激光主动探测系统进行探测的过程中，系统元件与系统内壁之间的轻微碰撞，从而造成激光发射方向与预计方向出现一定程度的偏差，所以需要建立激光发射方向出现视轴瞄准偏差下的回波信噪比数学模型。对光束波前施加偏轴项来模拟激光发射方向出现一定程度偏移的情况，偏移量^[21]的计算方法为

$$R = y_s \tan \alpha \quad (24)$$

式中， y_s 为实际激光照射位置与预计照射位置发生偏移量的大小。此情况下出射激光的电场强度分布 $U_{\text{op}}(x, y)$ 为

$$U_{\text{op}}(x, y) = U \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_{\text{t}}^2}\right) \exp(i k y_s \tan \delta) \quad (25)$$

式中 δ 为视轴瞄准偏差角度大小。使用式(25)来进行后续分析，从而得出激光出射方向发生偏差下的回波信噪比大小。

2 仿真分析

搭建一套用于理论模型验证的单光子激光主动探测系统，根据系统的基本参数来进行仿真实验分析。分别使用该系统测量距离地球表面600 km、1 000 km、2 000 km的目标，目标的面积大小约为5 m²，反射率 ρ 约为0.2，目标表面与激光出射方向垂直，太阳与接收系统的光轴方向约呈30°夹角。探测系统的结构参数如表1所示。

表1 单光子激光主动探测系统结构参数

Table 1 Structure parameters of single-photon laser active detection system

结构	系统参数	数值
激光	波长 λ/nm	1 064
	脉冲能量 $E_{\text{t}}/\mu\text{J}$	10
	重频 f_{rep}/Hz	100
	脉宽 t_{p}/ns	20
	发散角 φ/mrad	0.1
	光束质量 β	1.1
	前置放大器增益 G	1
	发射光学系统透过率 $\tau_{\text{t}}/\%$	89
	接收光学系统透过率 $\tau_{\text{r}}/\%$	50
	口径 A_{r}/mm^2	$250^2 \pi$
光学系统	视场角 $\theta_{\text{r}}/\text{mrad}$	0.56
	滤光片带宽 $\Delta \lambda/\text{nm}$	0.4
	点源透射比 T_{sp}	4.64×10^{-9}
	探测效率 η_{r}	0.6
	探测器感光面 $A_{\text{opt}}/\text{mm}^2$	$0.5^2 \pi$
	探测器带宽 $/\text{nm}$	1 000~1 700
	暗电流 J_{dc}/nA	0.2
	响应时间 t_{int}/ns	10
	死时间 $t_{\text{dead}}/\text{ms}$	0.1
	工作温度 T_{det}/K	290
探测器	负载电阻 $R_{\text{L}}/\text{M}\Omega$	100
	大气透过率 τ_{a}	0.942
其他参数	噪声因子 f	0.5

探测系统中使用的激光器为 1 064 nm 固体脉冲激光器, 其波长较长, 重频较低, 发散角较小, 可以减少激光在传输过程中衍射效应与大气效应对测距结果的影响。相比连续激光器, 脉冲激光器的发射能量较高、重频较低、能耗较小, 激光器的使用寿命较长。使用的单光子探测器为 InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管, 其主要应用于 0.9 μm ~ 1.7 μm 近红外波段的单光子探测。

将单光子激光探测的开环时间 t_{open} 设为 1 s, 代入到已经建立好的信噪比模型中, 模拟不同目标探测距离下的激光脉冲能量与回波信噪比大小之间的关系, 得出的结果如图 5 所示。

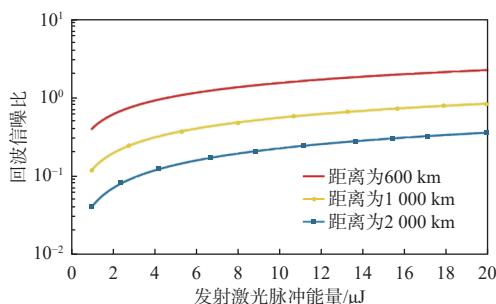


图 5 不同探测距离下的发射激光脉冲能量与回波信噪比大小的关系

Fig. 5 Relationship between energy of emitted laser pulses and signal-to-noise ratio of echoes under different detection distance conditions

从图 5 中可以看出, 使用此激光探测系统探测一定距离的目标, 使用的激光脉冲能量越大, 其回波信噪比也越大, 单光子探测器接收到的回波信号光子数越多。若使用固定能量的脉冲激光器进行激光主动探测, 其探测距离越远, 回波信噪比越小。

同时, 基于上述实验系统参数, 模拟不同接收口径下的激光脉冲能量与回波信噪比之间的关系。使用探测系统探测距离系统 1 000 km 的目标, 设定接收系统口径为 100 mm、200 mm、500 mm, 模拟不同接收系统口径下的激光脉冲能量与回波信噪比之间的关系, 得出的结果如图 6 所示。

接收系统的口径大小反映的是系统接收回波信号的能力。从图 6 可以看出, 当设定口径为 100 mm 时, 仿真模型计算出的回波信噪比结果与将口径设定为 200 mm 时计算出来的结果差异不大, 当接收口径设定为 500 mm 时, 其计算出来的回波信噪比结果明显大于将口径设定为 100 mm、200 mm 时的计算结果。所以, 在实际进行激光测距实验时,

接收系统口径越大, 最终计算出的回波信噪比越大, 能探测到距离更远的目标。

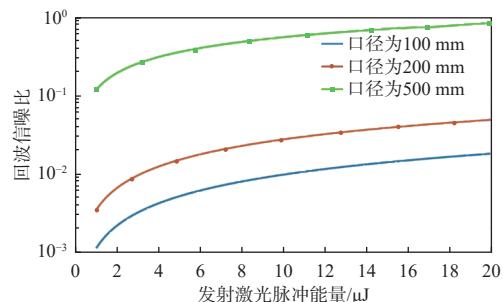


图 6 不同接收口径下的激光脉冲能量与回波信噪比大小之间的关系

Fig. 6 Relationship between laser pulse energy and echo signal-to-noise ratio under different receiving aperture sizes

使用此系统探测距离系统 1 000 km 的目标, 将上述已经建立好的考虑衍射的回波信噪比数学模型的计算结果与以激光雷达方程为基础建立的回波信噪比数学模型的计算结果进行比较, 得出的结果如图 7 所示。

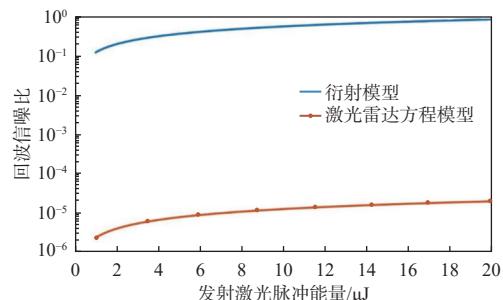


图 7 考虑衍射下的全链路仿真结果与以激光雷达方程为基础建立的模型计算结果比较

Fig. 7 Comparison of full-link simulation results under diffraction consideration with model computational results built on basis of lidar equations

如图 7 所示, 虚线为考虑了衍射效应的回波信噪比模型计算结果, 实线为以激光雷达方程为基础建立的回波信噪比模型计算结果。从图中可以看出, 考虑了衍射效应下的数学模型计算出来的结果比使用激光雷达方程为基础的数学模型计算结果大, 这是因为出射激光光场符合高斯分布, 能量更加集中。而使用激光雷达方程来进行回波信噪比计算时, 会将入射光束的能量分布看成均匀分布, 所以计算出来的结果比以激光雷达方程为基础建立的数学模型的计算结果大。

使用该测距系统进行仿真, 模拟当激光实际出射方向与预计方向发生一定程度偏差时的回波信噪比大小, 得出的结果如图 8 所示。

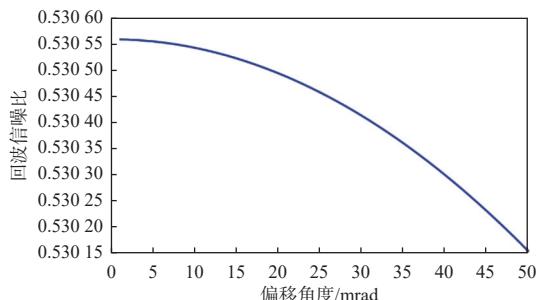


图 8 视轴瞄准偏差下的回波信噪比大小

Fig. 8 Echo signal-to-noise ratio sizes under consideration of aiming deviation of optic axis

如图 8 所示, 当实际激光出射方向与预计方向偏差角度较小时, 计算出来的回波信噪比大小与未发生瞄准偏差时的计算结果相比基本不发生变化, 当激光出射方向与预计方向偏差较大时, 计算出的回波信噪比大小的变化趋势比出射方向偏差较小时的计算结果变化更大, 所以在设计单光子激光测距系统时, 要对其结构进行合理设计, 并对设计结果进行分析。

3 结论

针对单光子激光主动探测传输链路比较复杂的情况, 本文建立了单光子激光主动探测回波信噪比数学模型。建立了脉冲激光在主动探测全链路中发生衍射效应下的回波信号模型, 计算了单光子探测器接收到的平均信号光子数。同时, 又分析了探测过程中可能产生的噪声来源, 定量计算了平均噪声光子数, 最终得到回波信噪比大小。搭建了一套用于实验的单光子激光测距系统, 根据系统的基本参数来进行数学模型的验证与分析, 并与以激光雷达方程为基础的信噪比模型的计算结果进行比较。模型仿真结果表明, 本文建立的数学模型简单可行, 在单光子激光主动探测系统的研制中, 对于脉冲激光器与单光子探测器的参数设计与选型具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] DEGNAN J. Satellite laser ranging: current status and future prospects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(4): 398-413.
- [2] 姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增刊1): 299-302.
JIANG Huilin, LIU Zhigang, TONG Shoufeng, et al. Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 299-302.
- [3] 刘博, 蒋贊, 王瑞, 等. 全天时单光子激光雷达技术进展与系统评价[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(1): 3788.
LIU Bo, JIANG Yun, WANG Rui, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 3788.
- [4] 王瀚基. 基于时间相关单光子计数技术的激光测距实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
WANG Hanji. Experimental study on laser ranging with time-correlated single photon counting techniques[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [5] WU H B, TAN S L, LIU M X, et al. Design and development of a single-photon laser and infrared common aperture optical system current optics and photonics[J]. *Current Optics and Photonics*, 2022, 6(2): 171-182.
- [6] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5186-5190.
HOU Libing, HUANG Genghua, KUANG Yaowu, et al. Research of photon counting laser ranging technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(18): 5186-5190.
- [7] 罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514001.
LUO Yuan, HE Yan, GENG Liming, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514001.
- [8] DEGNAN J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3/4): 503-549.
- [9] 沈成方, 张祥金, 张合. 阳光背景下小口径激光引信探测性能研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(12): 145-149.
SHEN Chengfang, ZHANG Xiangjin, ZHANG He. Research on detection performance of small caliber laser fuze under the sunlight[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(12): 145-149.
- [10] CHEN F T, WU L Y, CHEN C X, et al. Raman lidar at 355 nm using low dead time photon counting for atmo-

- spheric aerosol measurements[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(6): 1529-1537.
- [11] 邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(增刊1): 88-93.
- DENG Pan, ZHANG Tianshu, CHEN Wei, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): 88-93.
- [12] 张豪伟, 韩舸, 马昕, 等. 路径积分差分吸收激光雷达反演模型设计与测试[J]. 上海航天, 2023, 40(3): 37-45.
- ZHANG Haowei, HAN Ge, MA Xin, et al. Design and test of integral path differential absorption lidar inversion model[J]. *Aerospace Shanghai*, 2023, 40(3): 37-45.
- [13] 周飞, 陈奇, 刘浩, 等. 基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化[J]. 物理学报, 2024, 73(6): 340-347.
- ZHOU Fei, CHEN Qi, LIU Hao, et al. Noise characteristics analysis and suppression of optical system based on infrared superconducting single-photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(6): 340-347.
- [14] 何燃, 朱亮, 董俊发, 等. 基于 SPAD 单光子探测器的激光雷达建模与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(10): 1028003.
- HE Ran, ZHU Liang, DONG Junfa, et al. Modeling and simulation of lidar based on SPAD single photon detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(10): 1028003.
- [15] 王菊, 邵琦, 于晋龙, 等. 基于二次强度调制的激光测距系统[J]. 物理学报, 2023, 72(22): 45-53.
- WANG Ju, SHAO Qi, YU Jinlong, et al. Laser ranging system based on double intensity modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(22): 45-53.
- [16] ZHANG H T, LI Y Q, LI Z L, et al. Space debris laser ranging with range-gate-free superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Journal of the European Optical Society*, 2023, 19(1): 1-7.
- [17] LI S, ZHANG Z Y, MA Y, et al. Ranging performance models based on negative-binomial (NB) distribution for photon-counting lidars[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A861-A877.
- [18] PENG J Y, XIONG Z W, HUANG X, et al. Photon-effi- cient 3D imaging with a non-local neural network[M]// *Computer Vision – ECCV 2020*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 225-241.
- [19] 石顺祥, 王学恩, 马琳. 物理光学与应用光学[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 7.
- SHI Shunxiang, WANG Xue'en, MA Lin. *Physical optics and applied optics*[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 7.
- [20] 周磊. 基于回波信号的光束瞄准技术研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2013.
- ZHOU Lei. Study on laser pointing system using return photon signal[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [21] VOELZ D, BELLINGHAM G D. Computational fourier optics: a MATLAB tutorial[M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2010: 51.
- [22] 胡章芳. MATLAB 仿真及其在光学课程中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 158-159.
- HU Zhangfang. *MATLAB simulation and its application in optics course*[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015: 158-159.
- [23] 韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 758-766.
- HAN Yi, SUN Huayan. Advances in space target optical scattering character research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766.
- [24] 吴洪波, 张新, 王灵杰, 等. 单光子激光与中波红外共口径探测光学系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1260-1269.
- WU Hongbo, ZHANG Xin, WANG Lingjie, et al. Common aperture optical system of single photon laser and medium wave infrared[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1260-1269.
- [25] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 36-39.
- JIN Weiqi, HU Weijie. *Radiance photometry and colorimetry and their measurement*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 36-39.
- [26] MCMANAMON P. LiDAR technologies and systems[M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2019: 237-248.