

## 激光与光电子学进展

## 机载远程单光子测距激光器设计及仿真分析

熊英<sup>1,2\*</sup>, 羊毅<sup>2</sup>, 郝培育<sup>2</sup>, 李毅<sup>2</sup>, 孟轩<sup>2</sup><sup>1</sup>光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;<sup>2</sup>中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

**摘要** 为解决机载远程单光子测距激光器热稳定性差、受背景光噪声影响大的问题,提出了一种适用于机载环境的小型化、窄线宽、低能耗激光器设计方案。激光器采取主振荡功率放大构型。种子源激光器使用反射式体布拉格光栅作为耦合输出镜,在重复频率为 10 kHz 条件下,获得线宽为 0.035 nm 激光输出,光束质量为  $M_x^2 = 1.303$ ,  $M_y^2 = 1.271$ , 光光转换效率为 44.4%;放大器选用 innoslab 构型放大激光能量,可以有效缓解热问题、提升光束质量。为此,采用蒙特卡罗方法建立单光子测距回波信号模型,验证了提高激光器性能可以降低激光抖动对精度的影响,同时较窄的线宽输出可以采用相匹配的窄带滤光片来减少背景噪声干扰,从而提高测距精度。

**关键词** 激光器; 单光子测距; 反射式体布拉格光栅; 蒙特卡罗方法

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314007

## Design and Simulation Analysis of Airborne Long-Distance Single-Photon Ranging Laser

Xiong Ying<sup>1,2\*</sup>, Yang Yi<sup>2</sup>, Hao Peiyu<sup>2</sup>, Li Yi<sup>2</sup>, Meng Xuan<sup>2</sup><sup>1</sup>Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China;<sup>2</sup>Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China

**Abstract** In order to solve the problem of poor thermal stability and large influence of background light noise of the airborne long-distance single photon ranging laser, a design of the miniaturized, narrow line width, and low-energy laser suitable for an airborne environment is proposed. The laser adopts the main oscillation power amplification configuration. The seed source laser uses a reflecting volume Bragg grating as the coupling output mirror. Under the condition of 10 kHz repetition rate, the laser output with a line width of 0.035 nm is obtained, and the beam quality is  $M_x^2 = 1.303$  and  $M_y^2 = 1.271$ . The optical-optical conversion efficiency is 44.4%. The amplifier adopts the innoslab configuration to amplify the laser energy, effectively alleviating the thermal problem and improving the beam quality. The Monte Carlo method is used to establish a single-photon ranging echo signal model, which verifies that improving laser performance can reduce the impact of laser jitter on accuracy. At the same time, the narrower linewidth output can use a matched narrowband filter to reduce background noise interference, thereby improving the accuracy of ranging.

**Key words** lasers; single-photon ranging; reflecting volume Bragg grating; Monte Carlo method

**OCIS codes** 140.3280; 030.5260; 140.3460

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2020-09-26; 录用日期: 2020-10-13

基金项目: 装备预研中航工业联合基金(6141B05210101)

\*E-mail: hnhbxy@126.com

## 1 引言

近年来,随着空中远程作战能力的提升,对于机载光电探测系统提出了超视距对空、对地探测的作战需求<sup>[1]</sup>,其中远程小目标激光测距技术是亟待解决的关键技术之一。远程测距技术中,单光子激光测距是一种建立在统计理论基础,探测灵敏度达单光子量级的光电探测技术,测距光源采用高重复频率、低脉冲能量的激光器。单光子测距技术在航空航天领域具有广阔的发展前景,国内外科研机构均进行了大量的研究工作,美国航空航天局(NASA)于2011年研制的A-LISTS机载雷达系统采用0.1 mJ@10 kHz,脉宽为0.96 ns的激光器作为光源,达到了10 km的测程<sup>[2]</sup>;并且在2018年发射了ICESat-2卫星,其搭载的ATLAS激光高度计采用波长为532 nm,0.9 mJ@10 kHz,脉宽为1.5 ns激光器作为光源<sup>[3]</sup>。国内也有一些科研院所进行了研究<sup>[4-7]</sup>,2019年,中国科学院上海天文台研制了重复频率为4 kHz的卫星激光测距(SLR)系统采用0.75 mJ@4 kHz激光光源,用于卫星测距<sup>[4]</sup>。目前,国内外单光子测距的主要研究成果集中于人卫测距、星载测距等航天领域,也有中近程机载测距雷达采用此技术,但远程机载单光子测距研究较少,且高重复频率激光器用作机载测距光源存在热稳定性差、收发光轴不稳定、受背景光噪声影响大、体积受限、功耗高等亟待解决的问题。

本文设计了一种适用于机载环境的小型化、高重复频率、窄线宽的激光器,可用作机载远程单光子测距机光源。激光器采用主振荡功率放大(MOPA)构型,在满足机载环境对体积、功耗要求的同时,抑制了背景光噪声和激光器热效应。并使用蒙特卡罗方法建立了单光子测距回波信号模型,对测距系统精度进行了仿真,为提高机载百 km 测距系统的测距精度提供了理论依据。

## 2 基本原理

### 2.1 测距原理

受大气衰减、目标形状等影响,探测器接收的小信号回波光子数<sup>[8]</sup>为

$$N_{\text{sc}} = \left( \frac{E_i \eta_i}{\Omega_i} \right) \left( \frac{\eta_r \eta_q A_r}{\pi h \nu R^4} \right) (A_T \rho \cos \theta T_a^2), \quad (1)$$

式中: $E_i$ 为激光单脉冲能量; $\eta_i$ 为发射光学系统透

率; $\eta_r$ 为接收光学系统透过率; $\eta_q$ 为探测器量子效率; $\rho$ 为目标漫发射系数; $A_T$ 为目标有效反射面积; $A_r$ 为接收光学系统面积; $\theta$ 为激光发射系统光轴与目标法线夹角; $T_a$ 为大气单程透过率; $h\nu$ 为单个光子能量( $h$ 为普朗克常量, $\nu$ 为光子频率); $\Omega_i$ 为发射立体角; $R$ 为目标距离。

由(1)式可知,在其他参量不变的条件下,测距测程提高到百 km 以上,回波光子数减少,为达到探测器可探测的最小光子数,应提高激光发射能量,减小激光发散角。

将目标看作朗伯散射面,目标完全在接收视场内,到达探测器的背景噪声光子数<sup>[9]</sup>为

$$n_b = \left[ \frac{\pi}{16h\nu} (T_a \rho H_\lambda \cos \alpha \cos \varphi + \pi N_\lambda) \right] \times (\eta_r \theta_r^2 d_r^2 \Delta \lambda), \quad (2)$$

式中: $H_\lambda$ 为太阳光谱辐射照度; $N_\lambda$ 为大气散射的太阳光谱辐射亮度; $\alpha$ 为太阳射线和目标表面法线夹角; $\varphi$ 为目标表面法线与接收光轴夹角; $\theta_r$ 为接收视场角; $d_r$ 为接收物镜直径; $\Delta \lambda$ 为窄带滤光片光谱带宽。

由(2)式可知,接收系统的光谱带宽越窄,噪声光子数越小,因此通过设计窄线宽激光器,使其光谱中心与接收系统窄带滤光片相匹配,就可以抑制背景光噪声。

### 2.2 激光器设计依据

通过上述分析可知,远程单光子测距系统的光源需满足大能量、小发散角、窄线宽等要求。为了保证所需能量,激光器采用MOPA构型设计,即激光器由种子源和激光放大器组成,其组成框图如图1所示。

种子源激光器可以获得高重复频率、低脉冲能量、高光束质量的激光。反射式布拉格光栅(RBG)具有优异的波长选择性,可对衍射中心波长进行高效反射,将其作为种子源激光器的耦合输出镜可以压窄线宽。种子源激光器采用半导体激光器(LD)光纤耦合端面泵浦的设计可以获得高光束质量种子光。设计耦合系统需要考虑泵浦光与基模高斯光束的耦合效率。基模高斯光束的主要特征参量为<sup>[10]</sup>

$$R_M = \frac{2B}{D-A}, \quad (3)$$

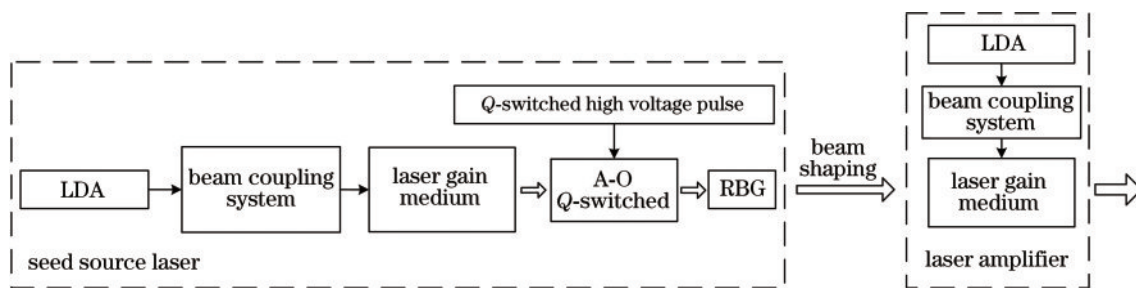


图 1 激光器组成框图

Fig. 1 Diagram of laser composition

$$\omega_M = \frac{\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \cdot |B|^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2\right]^{1/4}}, \quad (4)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}\right)^2}, \quad (5)$$

$$R(z) = z \left[ z + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z}\right)^2 \right], \quad (6)$$

式中： $R_M$ 、 $\omega_M$ 为参考平面处等相位面的曲率半径与光斑尺寸； $ABCD$ 为傍轴光束在腔内往返矩阵的元素。根据谐振腔具体几何结构计算腔内往返矩阵，代入(3)~(6)式即可计算腔内激光光斑半径，结果如图2所示，腔内光斑半径为250~270  $\mu\text{m}$ 。

激光放大器用于提升激光输出能量，考虑到机载环境下体积条件受限，采用单级多程放大结构。相对于棒状或微片等其他放大器结构，部分端面泵浦板条(innoslab)放大器通过大面冷却方式，使温度梯度呈一维分布，来抑制热退偏效应，改善光束质

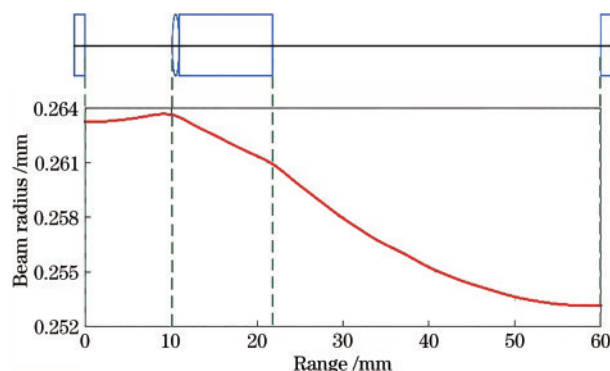


图 2 种子源激光器腔内激光光斑半径

Fig. 2 Laser spot radius in the seed source laser cavity

量，且种子光多次在增益介质内往返，可以有效提高激光器能效，获得高脉冲能量输出。

### 3 研究内容

#### 3.1 种子源激光器的设计

种子源激光器采用LD光纤耦合端面泵浦方案，谐振腔采用平平直腔结构，腔长为60 mm，装置如图3所示。

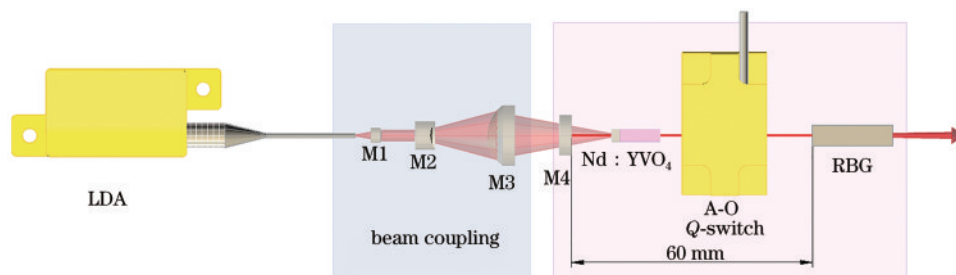


图 3 LD端面泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>种子源激光器装置图

Fig. 3 Experimental setup of LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> seed source laser

其中激光二极管阵列(LDA)中心波长为808 nm,最高连续输出功率为15 W,采用光纤耦合输出,光纤芯径为200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 $NA=0.22$ 。光束耦合系统首先通过一个短焦距透镜M1准直泵浦光束,再经由一个球面透镜M2和一个非球面镜M3

进行耦合聚焦,放大倍率为1:3,晶体端面泵浦光斑半径约为300  $\mu\text{m}$ ,可实现基模光束与泵浦光模式匹配<sup>[11]</sup>。激光工作物质为3 mm×3 mm×(2+10)mm Nd:YVO<sub>4</sub>键合晶体,Nd<sup>3+</sup>掺杂原子数分数为0.5%,未掺杂晶体可作为热沉,从而减缓热致退偏

和热透镜效应,改善 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体低热导率的影响,同时提高晶体抗损伤性能。激光晶体包裹钢箔装夹在热沉中,通过风冷和半导体制冷(TEC)进行温控。采用微型声光 Q 开关,调制频率为 10 kHz。腔镜 M4 镀膜为高反(HR)1064 nm+高透(HT)808 nm,耦合输出镜(OC)用 RBG 代替,中心波长为 1064 nm,光谱带宽为 0.035 nm,衍射效率为 75%。

### 3.2 放大器的设计

放大器采用 innoslab 构型,其构型设计图如图 4 所示。首先种子源激光注入,经由两个半波片(HWP)和光隔离器(ISO)进行光束隔离,再通过球

面凸透镜(FXY)、柱面凸透镜 FY1、柱面凹透镜 FY2 进行光束整形,进入 innoslab 薄板条工作物质。放大器 LD 阵列由 4 个 bar 条组成,中心波长为 808 nm,额定输出功率为 400 W。泵浦光耦合系统分为四个部分:泵浦光经由柱面镜组 1 慢轴会聚进入光波导,在光波导中进行光束匀化,通过柱面镜组 2 慢轴发散,最后经由一个聚焦镜在工作物质端面形成 0.4 mm×10 mm 的矩形光斑。板条上下两个面通过水冷散热,尺寸为 14 mm×10 mm×1 mm。放大器输出椭圆形光斑,X/Y 轴两个方向发散角不一致,后端还需要对输出光束进行整形。

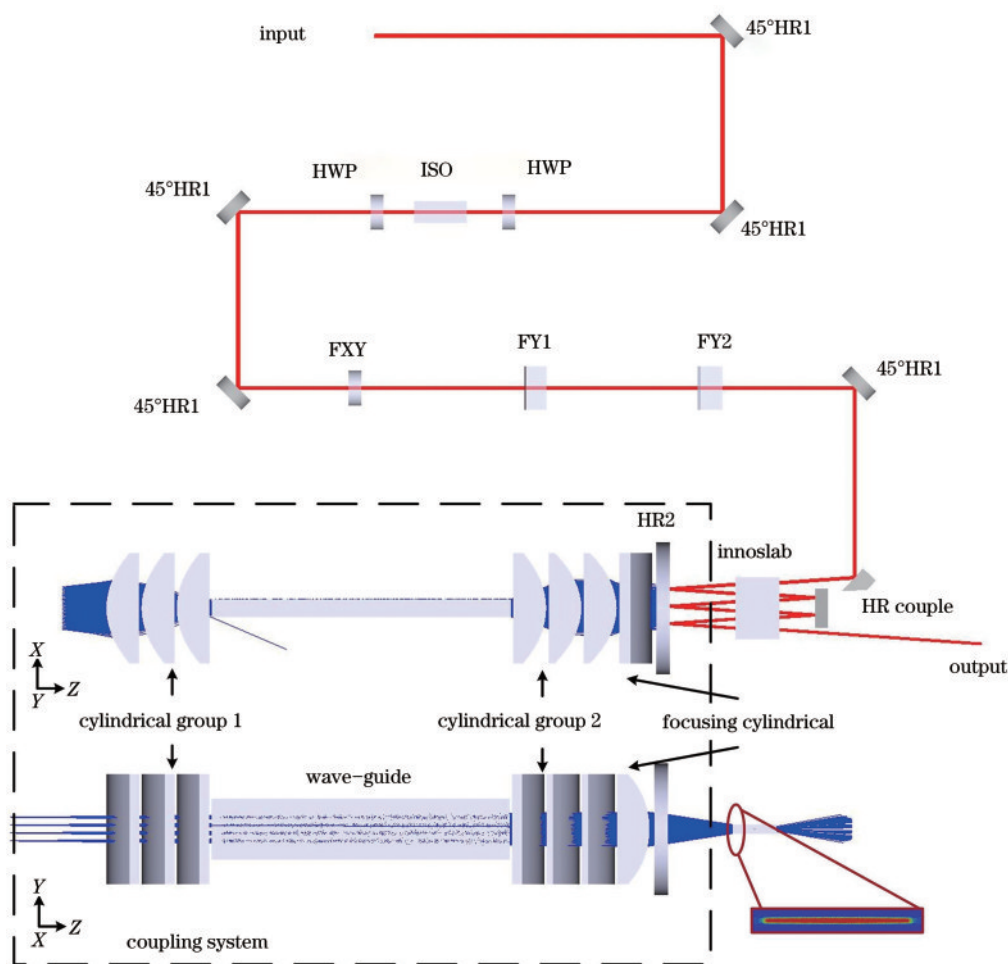


图 4 Innoslab 放大器构型图

Fig. 4 Innoslab amplifier configuration diagram

### 3.3 实验结果及分析

使用 Gentec-EO 功率计测量种子源激光器输出特性,结果如图 5(a)所示。由于工作物质的有效体积有限,随着泵浦能量的增大,输出激光脉冲平均功率逐渐增大并趋于饱和。在泵浦电流为 3 A、抽运光功率为 4.5 W、重复频率为 10 kHz 的条件下,

获得脉冲平均功率为 2 W,光光转换效率为 44.4%。

使用 New Focus 1623 型纳秒探测器以及 TELEDYNE LECROY 的 64MXs-B 型示波器测量激光脉冲波形,示波器带宽为 600 MHz。如图 5(b)所示,在重复频率为 10 kHz 输出条件下,获得激光

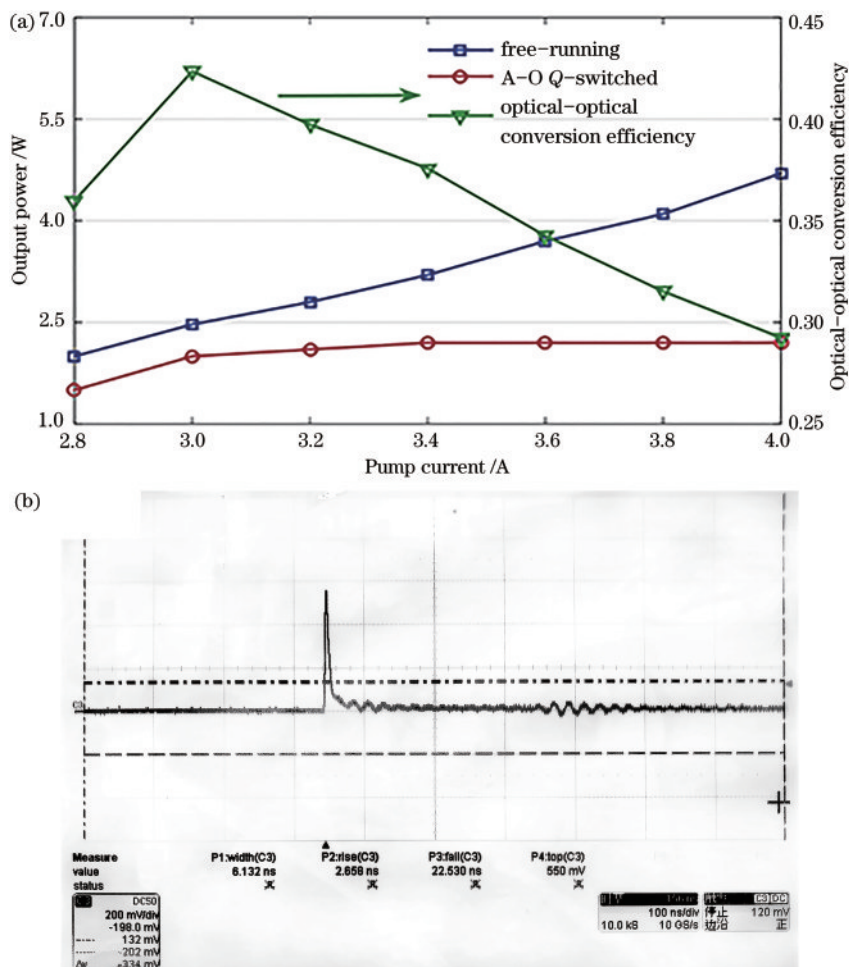


图 5 激光输出特性。(a)输出能量及效率;(b)脉宽

Fig. 5 Laser output characteristics. (a) Output power and efficiency; (b) pulse width

输出的脉冲宽度为 6.132 ns。

采用 YOKOGAWA 光谱分析仪对激光输出线宽进行测量,如图 6 所示,图 6(a)为 RBG 作耦合输

出镜的激光输出,中心波长为 1064.2 nm,线宽为 0.035 nm,图 6(b)为透过率为 70% 的普通输出镜线宽图,中心波长为 1064.1 nm,线宽为 0.099 nm。

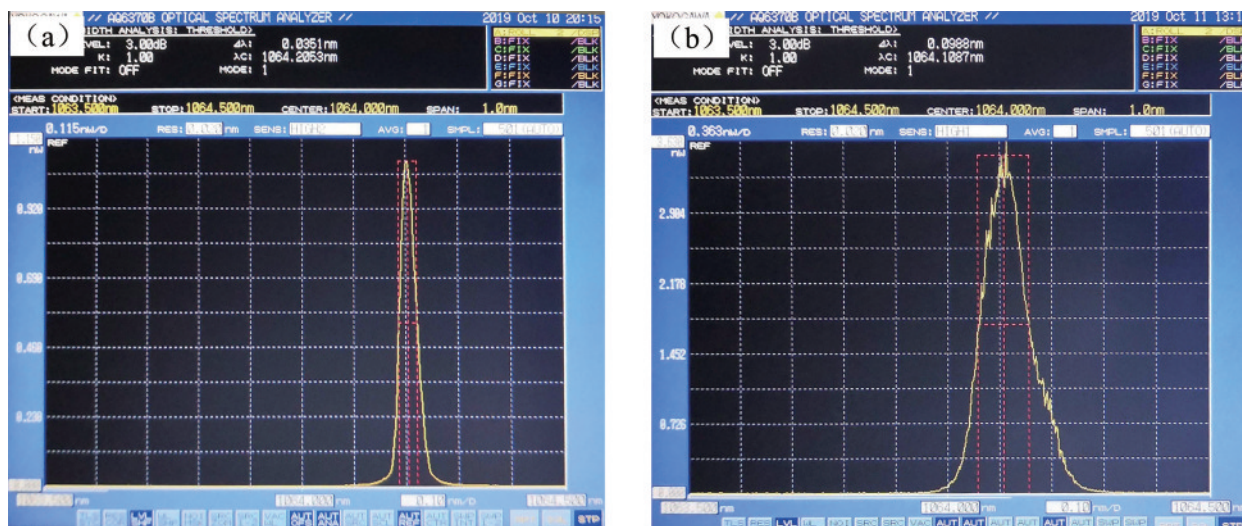


图 6 激光输出线宽。(a)RBG;(b)70% 输出镜

Fig. 6 Laser output line width. (a) RBG; (b) 70% output mirror

采用 Spiricon 公司激光光束质量分析仪对激光输出光斑进行测量,测量结果如图 7 所示,激光器输

出光束质量  $M_x^2 = 1.303, M_y^2 = 1.271$ , 发散角约为 1.5 mrad。

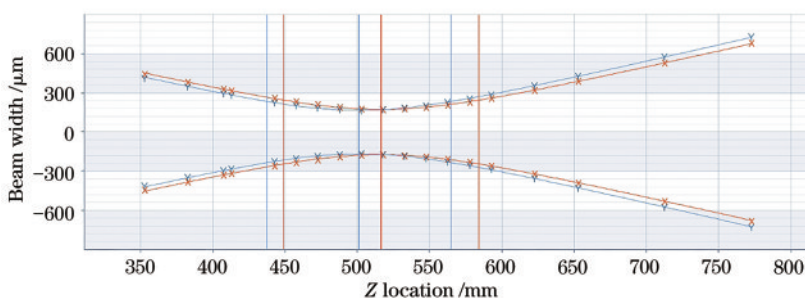


图 7 输出光束质量

Fig 7 Output beam quality

### 4 远程激光测距系统仿真分析

在机载单光子测距中激光器性能是一项重要指标,但影响测距效果的因素很多,测距精度也不仅仅取决于激光器。在其他条件不变的情况下,采用蒙特卡罗方法建立回波信号模型<sup>[12]</sup>,

分析激光器对测距系统性能的影响。

不考虑目标形状对回波信号波形的影响,对百 km 处目标的探测回波光子数进行仿真,得到结果如图 8 所示,图中展示了不同脉宽、不同窄带滤光片线宽、不同叠加次数的探测信号。采用参数:重复频率为 10 kHz、波长为 1064.2 nm 的激光器,单脉冲回

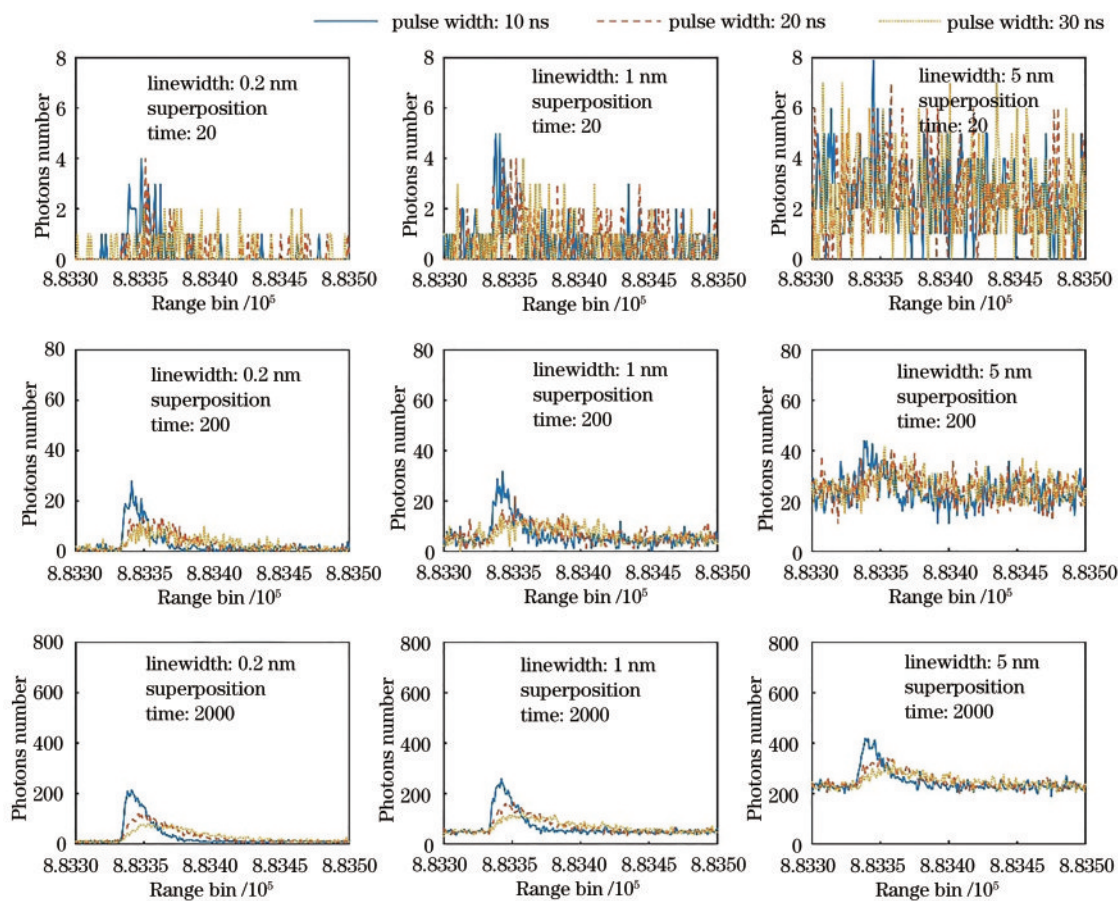


图 8 探测器响应光子数图

Fig. 8 Number of photons responded by the detector

波光子数为 2, 积分时间为 0.2 s, 时区长度为 0.4 ns, 窄带滤光片中心波长为 1064.2 nm, 探测器抖动时间为 0.3 ns, 噪声频率为 12.2 MHz, 目标运动速度为 3 Ma (1 Ma=340 m/s)。分析回波波形图可知, 随着叠加次数的增加, 信号波形更加明显, 更容易识别目标所在位置; 随着激光脉宽的增加, 对应回波波形也发生展宽, 探测灵敏度下降, 测距精度降低; 随着窄带滤光片线宽的减小, 激光背景噪声的影响也逐渐降低。

由于窄带滤光片线宽为半峰值处宽度, 为使激光器线宽为 0.035 nm 的激光输出处于窄带的最大透过率处, 测距接收系统采用线宽为 0.2 nm 的窄带滤光片, 相比于现阶段机载激光测距系统使用的线宽为 5 nm 的窄带滤光片, 预计可将背景噪声对接收系统的影响降低 25 倍。

由上述仿真可知, 在其他测距条件不变的情况下, 提高激光器性能可以减少激光抖动对精度的影响, 同时, 较窄的线宽输出可以采用相匹配的窄带滤光片来减少背景噪声干扰, 从而提高测距精度。

## 5 结 论

本文提出一种适用于机载环境的小型化、高重复频率、窄线宽、高光束质量的激光器。在重复频率为 10 kHz 的条件下, 种子源激光器采用微型声光 Q 开关和体布拉格光栅, 获得的激光脉宽为 6.32 ns、线宽为 0.035 nm, 光束质量良好,  $M_x^2 = 1.303$ ,  $M_y^2 = 1.271$ , 光光转换效率为 44.4%。同时设计了 innoslab 构型的放大器, 具有良好的热效应, 可以实现高功率输出。最后, 采用蒙特卡罗方法建立单光子测距回波信号模型, 分析了激光器对测距性能的优化效果。

本文所设计的激光器结构紧凑、热稳定性强、受背景光噪声影响小, 可适配于百 km 机载单光子激光测距仪光源。

## 参 考 文 献

- [1] Yu L S, Li Y B, Zhao Y L, et al. Development history and trend of fighter aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(12): 49-53.  
余丽山, 李彦彬, 赵永龙, 等. 战斗机的发展历程及趋势[J]. 飞航导弹, 2017(12): 49-53.
- [2] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8182: 818207.
- [3] Sawruk N W, Burns P M, Edwards R E, et al. ICESat-2 laser technology readiness level evolution [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 93420L.
- [4] 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.  
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.
- [5] Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1004001.  
刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1004001.
- [6] Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104003.  
丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003.
- [7] Chen Y, Yang Y. Extended pseudo-random coding rules with different repetition frequency based on single photon detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051204.  
陈雨, 羊毅. 基于单光子探测的不同重复频率下扩展伪随机编码规则 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051204.
- [8] Dai Y J. Technology of lidar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010: 179-180.  
戴永江. 激光雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 179-180.
- [9] Wu X G, Li C, Hao P Y, et al. Study and simulation on echo of single photon ranging [J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(1): 33-38.  
吴兴国, 李超, 郝培育, 等. 单光子测距回波特征研究与仿真 [J]. 电光与控制, 2016, 23(1): 33-38.
- [10] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R. Principle of laser [M]. 7<sup>th</sup> ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 68-83.  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理 [M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 68-83.

- [11] Clarkson W A, Hanna D C. Efficient Nd: YAG laser end pumped by a 20-W diode-laser bar [J]. Optics Letters, 1996, 21(12): 869-871.
- [12] Liu C H, Chen Y F, He W J, et al. Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 382-387.
- 刘骋昊, 陈云飞, 何伟基, 等. 单光子测距系统仿真及精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 382-387.