

文章编号 1004-924X(2025)09-1388-08

基于超辐射发光二极管的并行抗干扰激光雷达

陈 聪^{1,2,3}, 高俊隼^{1,2,3}, 陶春燕^{1,2,3}, 高震森^{1,2,3}, 王安帮^{1,2,3},
李毓洲^{1,2,3}, 郝明明^{1,2,3*}

- (1. 广东工业大学 信息工程学院 先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;
2. 广东工业大学 通感融合光子技术教育部重点实验室, 广东 广州 510006;
3. 广东工业大学 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 多个激光雷达在同一环境中同时工作时会互相干扰而引发事故, 为了有效解决多雷达系统中的干扰问题, 提出了一种利用超辐射发光二极管产生的宽带非相干自发辐射噪声源, 并行探测的激光雷达方案; 该方案不需要经过复杂的调制, 并且通过滤波方案实现多个模式并行输出, 每个模式之间没有相关性从而具有强抗干扰能力。多通道的发射及探测也可以提升成像速度。在此基础上, 搭建了四通道并行抗干扰激光雷达系统, 利用光纤阵列及振镜组成的发射接收系统实现了 0.3 m 的三维成像, 获得了 5 cm × 7 cm 的目标场景图像, 测距精度达到 1.6 mm; 并评估该系统的抗干扰能力, 可抵御 11.2 dB 其他类似激光雷达信号的干扰。

关键词: 激光雷达; 抗干扰; 超辐射二极管; 放大自发辐射噪声

中图分类号: TP212; TN249 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253309.1388

CSTR: 32169.14.OPE.20253309.1388

Parallel anti-interference LiDAR based on super-luminescent diode

CHEN Cong^{1,2,3}, GAO Junjian^{1,2,3}, TAO Chunyan^{1,2,3}, GAO Zhensen^{1,2,3},
WANG Anbang^{1,2,3}, LI Yuzhou^{1,2,3}, HAO Mingming^{1,2,3*}

- (1. Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
 2. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)
- * Corresponding author, E-mail: haomm@gdut.edu.cn

Abstract: As the increasing deployment of multiple LiDAR units within shared environments has introduced significant challenges, particularly due to mutual interference among coexisting systems. Such interference can cause substantial disruptions and elevate the risk of accidents, thereby rendering the mitigation of multi-LiDAR interference a critical research focus. This study proposes an innovative LiDAR scheme

收稿日期: 2025-01-07; 修订日期: 2025-03-04.

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (No. 2020B090922001); 广东省自然科学基金资助项目 (No. 2020A1515011550)

utilizing a wideband incoherent spontaneous emission noise source generated by a super-luminescent diode (SLD), enabling parallel detection without reliance on complex modulation techniques. Through a filtering approach, the system achieves parallel output across multiple uncorrelated modes, which substantially enhances its anti-interference performance. Moreover, the implementation of multi-channel transmission and detection contributes to improved imaging speed. A four-channel parallel anti-interference LiDAR system was developed based on this concept, incorporating a fiber-optic array and a galvanometer for signal transmission and reception, and capable of three-dimensional imaging at a 0.3 m range. The system successfully reconstructed a target scene measuring 5 cm $\times$ 7 cm, achieving a ranging accuracy of 1.6 mm. The system's anti-interference capability was further validated, demonstrating resilience against interference from analogous LiDAR signals with a signal-to-noise ratio up to 11.2 dB. The findings present a viable approach to enhancing the reliability and safety of LiDAR systems operating within complex, multi-device environments.

Key words: LiDAR; anti-interference; super-luminescent diode; amplification of spontaneous emission noise

1 引 言

随着激光雷达技术的不断进步,其应用领域日益广泛,新技术层出不穷。近年来,激光雷达在向着抗干扰、大视场、快速成像等方面发展,目前大多数激光雷达采用单通道半导体激光器或光纤激光器发射脉冲激光信号,通过并快速扫描实现三维成像,增强了对周围环境的全面感知能力,提升了成像速度^[1-4]。尽管如此,激光雷达技术仍面临着信号干扰的挑战。由于大多数激光雷达均使用 905 nm 的工作波段,商用脉冲激光雷达会受到来自相邻信道之间的干扰或其他同类型雷达的干扰;调频连续波激光雷达也会受到同类型雷达的干扰,导致测距精度下降、虚警或图像失真^[5-7]。随着自动驾驶技术和仓库搬运无人车的推广,激光雷达的数量会大大增加,从而加大了激光雷达之间相互干扰的概率^[8-9]。为了解决上述问题,研究人员提出了一种利用伪随机调制的连续激光作为探测信号的技术方案。该方法通过将目标后向散射的回波光信号与参考信号进行互相关运算,以精确提取目标的位置信息。这种技术在地形剖面测绘、二氧化碳浓度监测、生物气溶胶检测以及大气成分分析等领域具有应用潜力^[10-12],此方法虽然能够提高抗干扰能力,但需要昂贵的伪随机码发生器和高速调制器,同时范围分辨率也受到调制器调制带宽的限制

制^[13-15]。随后,有研究者提出采用混沌激光信号来进行测距成像。混沌激光信号通常由光反馈、光注入,光电反馈产生,在时序上具有类噪声的随机特性,以及天然的抗干扰效果^[16-18],同时宽带频谱使其具有良好的分辨率。Lin提出了基于时分复用的多输入多输出多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)混沌激光雷达,获得了目标物体尺寸视场的三维图像^[19]。Lukashchuk研究了多通道混沌梳激光雷达,其中,多通道混沌信号由连续波泵浦绝缘体铝镓砷微谐振器产生^[20]。

本文利用超辐射发光二极管(Super-Luminescent Diode, SLD)产生的自发辐射放大(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声作为光源,实现并行探测的激光雷达系统。SLD发出的放大自发辐射噪声ASE,具有宽光谱、高功率、低噪声等优点,不需要调制就具有天然的抗干扰能力,通过阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)滤出多路ASE噪声信号作为激光雷达发射信号,结构简单、成本低,并且具有良好的测距性能。ASE噪声信号具有天然的抗干扰效果^[16-18],其自相关函数是理想的 δ 函数,在频域上为宽带连续功率谱。其探测原理是在发射前分出一部分光作为参考光,同时通过向目标发射激光探测信号,收集目标回波信号,并与参考信号进行相关运算,得到目标的距离信息。实验通过

透镜准直光线阵列发射的四路激光信号,结合三维扫描成像技术,构建四通道并行激光雷达系统。该系统易于组装,不需要对收发双端进行精密校准,同时对该并行激光雷达系统进行性能分析,包括抗干扰能力、测距精度等,并展示了其三维成像效果。

2 实验装置及原理

2.1 并行 ASE 噪声激光雷达系统

三维成像实验装置如图 1 所示,该系统主要

由光源 SLD、发射与接收光路和信号处理模块 3 部分组成。将 SLD 产生的 ASE 噪声通过分束器分出 10% 的光作为参考光,剩下 90% 通过 AWG 滤波出多路不同中心波长的激光信号,随后通过放大器进行放大,进入环形器作为探测光耦合进光纤阵列,经过光纤阵列导出的空间光束,再经过准直透镜后直接发射至目标物体,回波光信号返回准直透镜后,通过环形器、光放大器之后由 20 GHz 带宽的探测器进行信号探测。数字存储示波器以 40 GSa/s 的采样率同时采集参考信号和回波信号,并输入计算机进行数据处理。

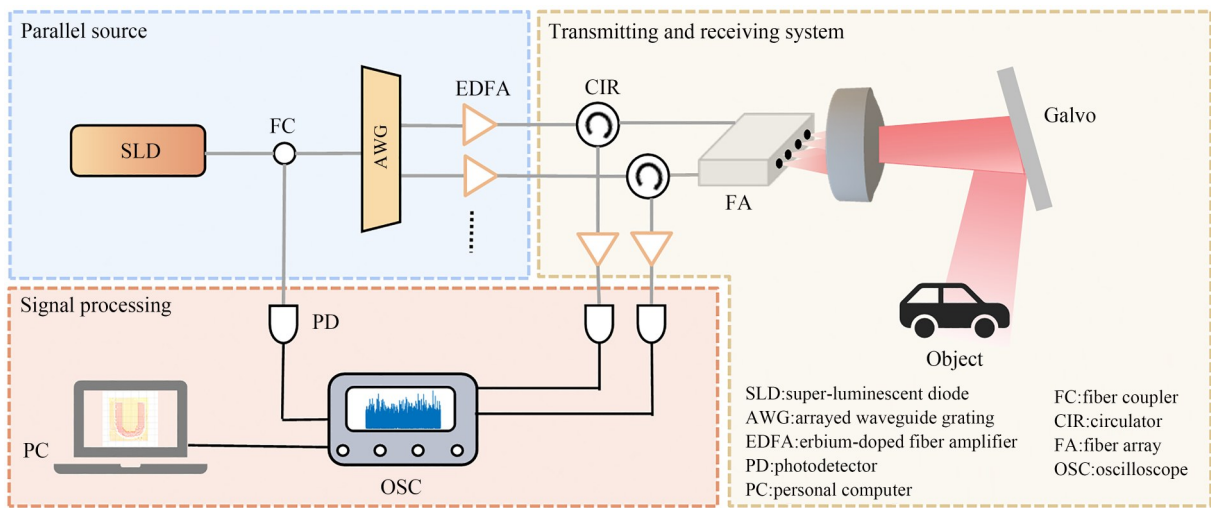


图 1 三维成像实验装置

Fig. 1 Experimental setup of three-dimensional imaging system

2.2 三维成像测量原理

由于 ASE 噪声信号的相关曲线是理想的 δ 函数,可以用相关测距来确定距离,其原理可以描述为:

$$S(\tau) = S_{\text{ref}} \otimes S_{\text{echo}} = \frac{1}{T} \int_0^T S_{\text{ref}}(t) S_{\text{echo}}(t - \tau) dt \approx k \delta(\tau - \tau_0), \quad (1)$$

式中: S_{ref} 是光电探测器转换后的参考信号, S_{echo} 是光电探测器转换后的回波信号, k 是激光在空气中传播的损耗系数。将两个信号进行互相关运算,可以得到参考信号与空间目标之间的时间延迟 τ_0 ,从而得到目标的距离。通过四路信号对空间中的物体并行扫描,得到距离信息后利用坐标变换为目标的三维信息,实现目标物体的三维成像。

3 实验结果及讨论

3.1 信号分析

SLD 产生宽带 ASE 噪声,使用 AWG 在 1 550.517~1 566.723 nm 之间可滤出 42 路平均功率为 -15.8 dBm,标准偏差为 -16 dB 的光,实验中使用中心波长在 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的光,其光谱间隔为 0.4 nm,中心波长分别为 1 550.51, 1 550.91, 1 551.31, 1 551.72 nm。虽然只采用 4 路信号进行实验验证,实验结果表明,该雷达具备 42 路信号并行扫描成像的潜力。SLD 和 4 个滤波信号的光谱如图 2 所示,光谱测量采用型号为 APA2081A 光谱仪,分辨率为 0.03 nm。

实验同时分析了 4 路 ASE 噪声信号的时序、频谱图和自相关曲线,如图 3 所示,其噪声特性使

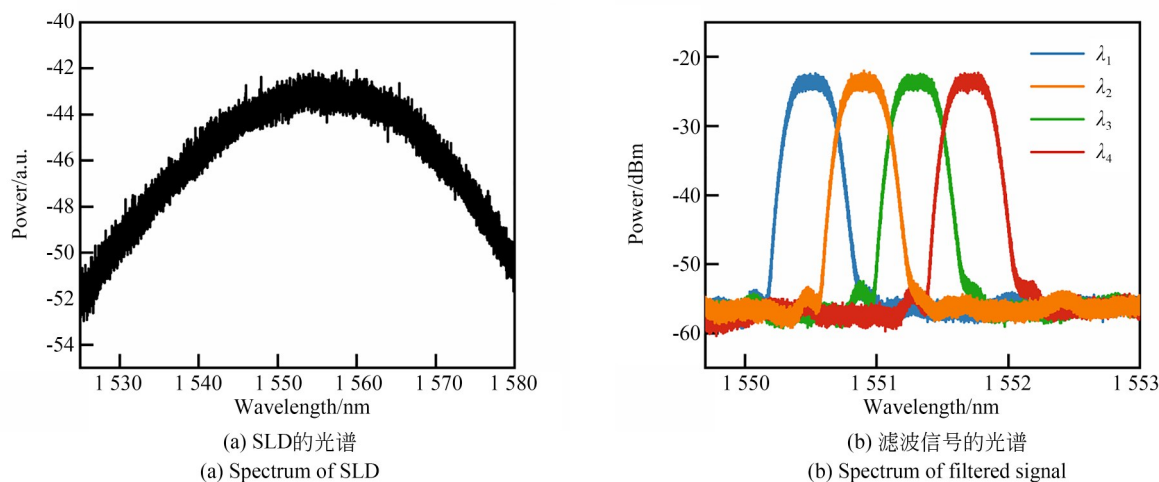


图2 SLD和滤波信号的光谱
Fig. 2 Spectra of SLD and filtered signal

信号具有天然的抗干扰能力。ASE噪声信号对应的自相关曲线中未出现旁瓣特征,从而消除自干扰引起的距离分辨模糊问题,该曲线的半高全宽为0.05 ns。该值与范围分辨率直接相关,表示接收到两个不同距离的回波后能分辨的最小距离,具体公式如下:

$$R = \frac{c \times F}{2}, \quad (2)$$

其中: R 是范围分辨率, c 是光速, F 是自相关曲线的半高全宽。因此,4路信号的理论分辨率可达

0.75 cm。从图3(c)可以看出,每路信号具有宽带且平坦的频谱。

不同于传统的脉冲激光雷达,同时发射多路信号之间会互相干扰,从SLD滤出的相邻信号之间没有相关性。实验中,通过实时采集两路通过AWG滤波后的信号,经过光电探测器转换后进行互相关运算,结果如图4所示。同时还测量了每路信号之间的相关性,其相关性均低于0.02,这意味着可以多路信号并行探测,可以大大提升成像速度。

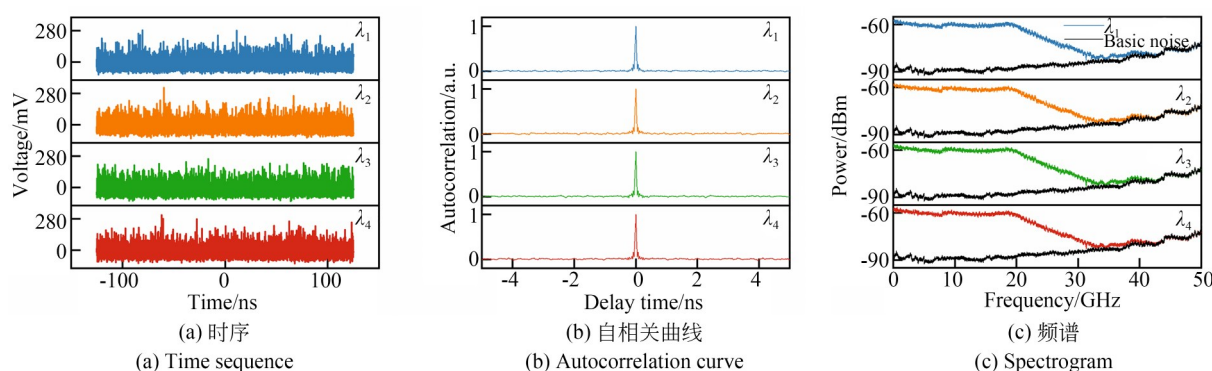


图3 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 的时序图、自相关曲线以及频谱
Fig. 3 Time series, autocorrelation curves and spectra of $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ and λ_4

3.2 ASE噪声激光雷达的测距精度及三维成像

为了评估该雷达的测距精度,本文在雷达前方放置一个漫反射率为90%的白板,在3 m内通过移动来测量距离变化。实验中,SLD产生宽带ASE噪声信号,通过AWG滤出中心波长为

1550.51 nm的信号,经过放大后滤出10%作为参考信号,其余的90%作为探测信号,耦合进环形器后,通过光纤阵列和准直透镜后发射到白板上,在10 dBm的发射功率下,记录每次移动10 cm距离后100次测量的标准差,该值作为雷

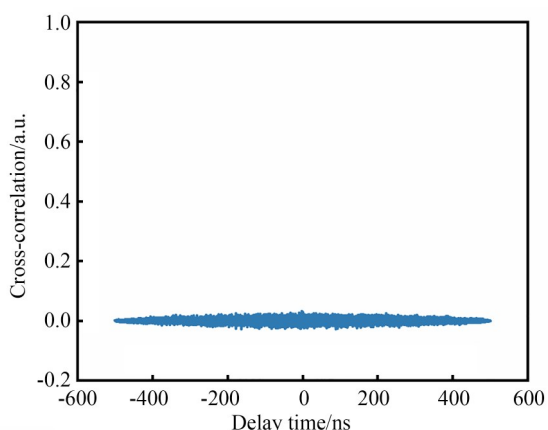


图 4 相邻信号的互相关曲线

Fig. 4 Cross-correlation curve of adjacent signals

达的测距精度。实验表明,在 64 GSa/s 的采样率下,该激光雷达系统可以达到 1.6 mm 的测距精

度,并通过高分辨率三维成像来进一步展示该并行激光雷达的能力。通过软件控制激光雷达系统,配合振镜进行线阵扫描,在 10 dBm 的发射功率下实现了目标物体的三维扫描成像。通过四通道并行扫描 0.3 m 处尺寸为 5 cm×7 cm 的目标,通过每一路的回波信号与参考信号互相关运算后得到目标物体的距离信息,并转化为三维坐标信息。实验发现,相较于单独每一路分出参考光信号后再与回波信号进行互相关运算,回波信号直接与 SLD 分出的 10% 参考光信号进行互相关运算的相关性会大大降低,其原因是参考信号还包含其他波长的信息,但在本文三维成像实验中也能满足探测要求,并降低系统复杂度。结果如图 5 所示,根据点云图可以看出,被测物体的形状细节以及尺寸,与实物基本一致。

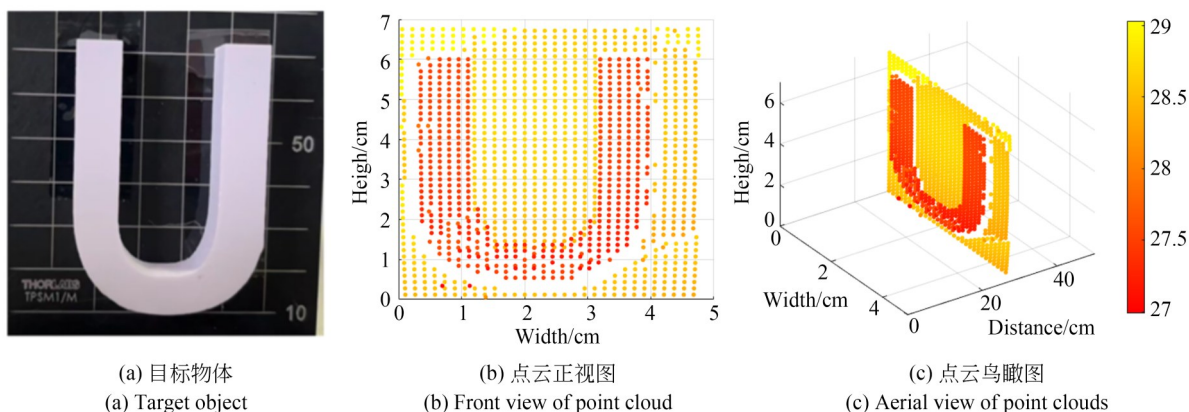


图 5 目标物体及三维点云

Fig. 5 Object under test and 3D point cloud

3.3 抗干扰能力分析

在实现激光雷达系统的线阵扫描成像后,对该激光雷达系统进行抗干扰能力测试,实验原理与测距一致,在距离激光雷达 1 m 位置处放置漫反射率为 90% 的白板,通过产生另外一路 ASE 噪声激光信号作为干扰信号,跟回波信号一起放大后与参考信号进行互相关运算,通过改变干扰信号功率,以此来模拟同类型雷达的干扰效果。这里定义干信比 I 来定量衡量干扰信号对主要回波信号的强度干扰,其公式如下:

$$I = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_s} \right), \quad (3)$$

其中: P_i 是干扰信号的功率, P_s 是回波信号的

功率。

实验结果如图 6 所示,随着干扰信号强度的增大,互相关曲线的峰值逐渐降低,当 I 增加到 12.13 dB 时,目标峰值被淹没在噪声中,无法确定目标位置。

利用相关曲线的峰值噪声比 N 来定量衡量干扰信号增大对测距结果的影响,其定义如下:

$$N = 10 \times \log_{10} \left[\frac{L}{\bar{n} + 3\delta(n)} \right], \quad (4)$$

其中: L 是互相关曲线的峰值, n 是基底噪声, $\bar{n}$ 是基底噪声的平均值, δ 是表示取标准差。

随着干信比的逐渐增大,峰值噪声比逐渐下

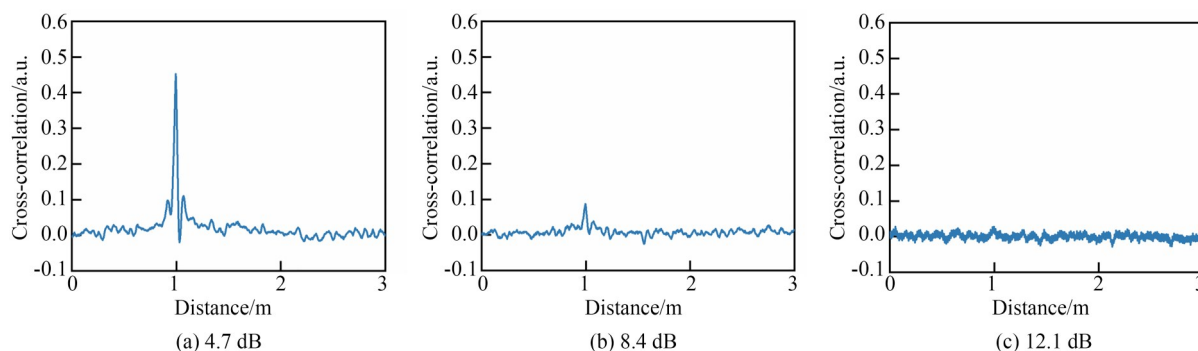


图6 不同干信比下的测距结果

Fig. 6 Ranging effect at different interference intensities

降,图7是在采样时间为 $1\mu\text{s}$,采样率为 40GSa/s 的情况下的实验结果。从拟合曲线可以看到,在受到同类型ASE噪声信号干扰时,当干信比 I 达到 11.5dB ,峰值噪声比下降到 3dB 。依据 3dB 判据,当 I 高于 11.5dB 时,无法从背景噪声中识别目标。此外,实验发现,随着采样时间的增加,该激光雷达系统的抗干扰能力越强,因此,该激光雷达系统至少能抵御 11.5dB 同类型雷达的干扰。同时测试了ASE噪声激光雷达对于脉宽为 20ns ,重复频率为 1MHz 的常规脉冲激光信号及随机调制连续波信号的抗干扰能力,结果如图7所示。该系统能够抵御 11.2dB 的随机调制连续波干扰以及 10.62dB 的脉冲信号干扰,对于其他类型的信号也具有强抗干扰能力。

为了对比常规脉冲激光雷达和ASE噪声激光雷达受到同类型激光雷达交叉干扰的情况,进

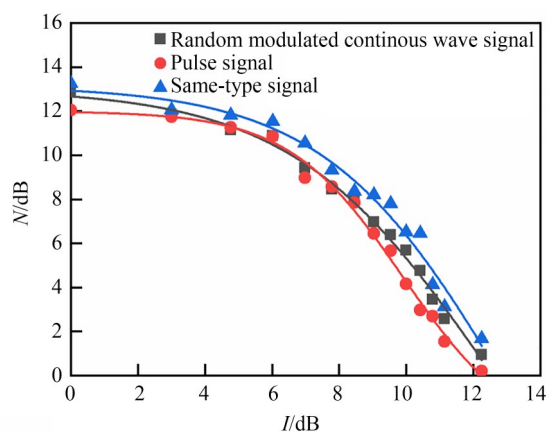


图7 峰值噪声比随着干信比的变化趋势

Fig. 7 Variation of peak noise-to-signal ratio with interference intensity

行了测试实验。其中,雷达A对前方目标进行探测,同类型激光雷达发射相同功率信号并进入雷达A的接收系统,以此来模拟同类型激光雷达雷达的干扰,测量 1.5m 处的目标,对比脉冲激光雷达和ASE噪声激光雷达在受到同类型激光雷达干扰后的100次测量结果。在采样时间为 $1\mu\text{s}$ 的情况下,ASE噪声激光雷达的测量时间是实验脉冲激光雷达测量时间的7倍。实验结果表明,脉冲激光雷达的测距效果受到很大影响,测距结果的错误较多,而ASE噪声激光雷达仍然保持良好的测距效果,如图8所示。

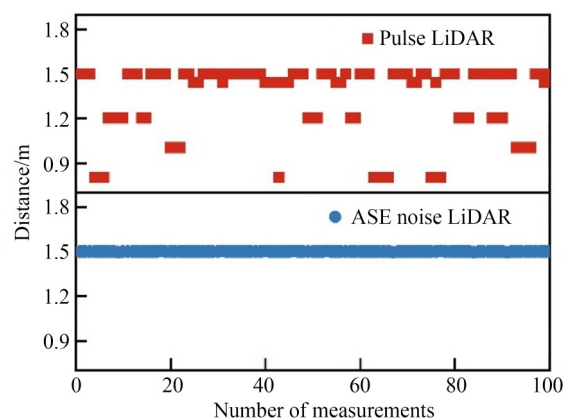


图8 脉冲雷达和ASE雷达在干扰下的测距结果

Fig. 8 Ranging results of pulse radar and ASE LiDAR under jamming

4 结 论

本文展示了一种利用SLD产生的ASE噪声作为发射信号的并行激光雷达,采用波分复用技术滤出4路信号,每路信号之间均没有相关

性且具有宽带频谱,搭配振镜并行扫描三维成像。该系统具有优良的测距性能和强抗干扰能力,可以实现 1.6 mm 的测距精度,在采样时间为 1 μ s 的情况下,具有 11.2 dB 的抗干扰能力。并行激光雷达系统不需要经过复杂的调制,结构简单,对比常规脉冲激光雷达,在受到同类型雷达干扰时的抗干扰能力强,具有商业化、前景好的优势,适用于多个雷达系统同时工作的场景。不过,频分复用会导致每路信号功率低,测

量距离有限,同时信号的采样和处理也需要更长的时间。

作者贡献声明:

陈聪:实验验证,论文构思和撰写;

高俊健:测量程序设计,数据整理和分析;

陶春燕:前期调查与论文审核;

高震森、王安邦、李毓洲、郝明明:提供资源和指导。

参考文献:

- [1] MOLEBNY V, MCMANAMON P, STEINVALL O, *et al.* Laser radar: historical prospective-from the east to the west[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56: 031220.
- [2] ARIKUMAR K S, DEEPAK KUMAR A, GADEKALLU T R, *et al.* Real-time 3D object detection and classification in autonomous driving environment using 3D LiDAR and camera sensors[J]. *Electronics*, 2022, 11(24): 4203.
- [3] ALDAO E, GONZÁLEZ-DE SANTOS L, GONZÁLEZ-JORGE H. LiDAR based detect and avoid system for UAV navigation in UAM corridors[J]. *Drones*, 2022, 6(8): 185.
- [4] PANEQUE J, VALSECA V, MARTINEZ-DE DIOS J R, *et al.* Autonomous reactive LiDAR-based mapping for powerline inspection[C]. 2022 *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. June 21-24, 2022. Dubrovnik, Croatia. IEEE, 2022: 962-971.
- [5] LOPAC N, JURDANA I, BRNELIĆ A, *et al.* Application of laser systems for detection and ranging in the modern road transportation and maritime sector[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 5946.
- [6] NOROUZIAN F, PIRKANI A, HOARE E, *et al.* Phenomenology of automotive radar interference[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(9): 1045-1060.
- [7] WANG Y, ZHANG Q, WEI Z, *et al.* Performance analysis of uncoordinated interference mitigation for automotive radar[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 4222-4235.
- [8] HAIDER A, PIGNICZKI M, KÖHLER M H, *et al.* Development of high-fidelity automotive LiDAR sensor model with standardized interfaces[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7556.
- [9] KIM G, EOM J, PARK Y. Alien pulse rejection in concurrent firing LIDAR[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1129.
- [10] MATTHEY R, MITEV V. Pseudo-random noise-continuous-wave laser radar for surface and cloud measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3/4/5): 557-571.
- [11] YANG Z J, LI C, YU M, *et al.* Compact 405-nm random-modulation continuous wave lidar for stand-off biological warfare detection[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 096042.
- [12] QUATREVALET M, AI X, PEREZ-SERRANO A, *et al.* Atmospheric CO₂ sensing with a random modulation continuous wave integrated path differential absorption lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 157-167.
- [13] XU Z Y, YU F X, QIU B W, *et al.* Coherent random-modulated continuous-wave LiDAR based on phase-coded subcarrier modulation[J]. *Photonics*, 2021, 8(11): 475.
- [14] AI X, NOCK R, RARITY J G, *et al.* High-resolution random-modulation cw lidar[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4478-4488.
- [15] HWANG I P, LEE C H. Mutual interferences of a true-random LiDAR with other LiDAR signals[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 124123-124133.
- [16] SCIAMANNA M, SHORE K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [17] WANG A B, YANG Y B, WANG B J, *et al.* Generation of wideband chaos with suppressed

- time-delay signature by delayed self-interference [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [18] 张天舒,王冰洁,徐航,等. 面向车载应用的混沌激光成像雷达抑制交叉干扰实验研究[J]. 半导体光电, 2021, 42(3): 424-429.
- ZHANG T SH, WANG B J, XU H, *et al.* Mutual interference suppression of chaotic imaging lidar for automotive application[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(3): 424-429. (in Chinese)
- [19] CHEN J-D, WU K-W, HO H L, *et al.* 3-D multi-input multi-output (MIMO) pulsed chaos lidar based on time-division multiplexing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 1-9.
- [20] LUKASHCHUK A, RIEMENSBERGER J, STROGANOV A, *et al.* Chaotic microcomb inertia-free parallel ranging [J]. *APL Photonics*, 2023, 8(5): 056102.

作者简介:



陈 聪(1999—),男,广东揭阳人,硕士研究生,2022年于广州航海学院获得学士学位,主要从事抗干扰激光雷达的研究。E-mail: chencong_19@163.com

通讯作者:



郝明明(1984—),男,内蒙古包头人,博士,副教授,硕士生导师,2006年于内蒙古大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电子器件可靠性的研究。E-mail: haomm@gdut.edu.cn