

激光与光电子学进展

光跳频激光雷达及其抗干扰性能研究

陈永龙¹, 谢瑛珂^{2*}, 梁恒恒³, 张兴红¹, 刘成¹¹重庆理工大学两江国际学院, 重庆 401135;²重庆理工大学理学院, 重庆 400054;³重庆理工大学两江人工智能学院, 重庆 401135

摘要 激光雷达间的相互干扰是影响无人驾驶安全的核心问题之一。本文提出了一种光跳频(LFH)车载激光雷达系统及其相关测距方法,并通过仿真与实验分析了该LFH激光雷达在不同干扰条件下的抗干扰性能。结果表明,基于相关检测的LFH激光雷达能有效抵抗不同数量和强度的同类型LFH、脉冲、调频连续波和连续波激光雷达的干扰,且在不同类型干扰实验下的测距相对误差小于等于1.5%。这表明LFH激光雷达具备较好的抗干扰能力。

关键词 遥感; 激光雷达; 抗干扰; 光跳频; 相关检测; 无人驾驶

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1328003

Investigation of Light Frequency-Hopping LiDAR and Its Anti-Interference Performance

Chen Yonglong¹, Xie Yingke^{2*}, Liang Hengheng³, Zhang Xinghong¹, Liu Cheng¹¹Liangjiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China;²College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;³Liangjiang Artificial Intelligence College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China

Abstract Mutual interference between LiDARs is a critical problem that affects the safety of driverless cars. In this paper, a vehicle-mounted, light frequency-hopping (LFH) LiDAR system and its related ranging method are proposed. The anti-interference performance of the LFH LiDAR is analyzed under different interference conditions by simulations and experiments. The results show that the LFH LiDAR based on correlation detection can effectively resist the interference from the same type of LFH, pulse, frequency-modulated continuous wave, and continuous-wave LiDAR in different quantity and intensity cases. In the experiment involving different types of interferences, the relative error of the detection range is less than or equal to 1.5%. It indicates that the LFH LiDAR has reliable anti-interference performance.

Key words remote sensing; LiDAR; anti-interference; light frequency-hopping; correlation detection; autonomous driving

1 引言

激光雷达可以准确、快速获取被测目标密集和详细的三维点云信息,是一种常用的高分辨率成像技术^[1-2],同时也是实现无人驾驶的核心传感器之一^[3-5]。但不同车载激光雷达信号之间的相互干扰和外部蓄意干扰会导致激光雷达传感器无法正确识别行人、车辆、物体和障碍等信息,从而危及交通安全^[6-9]。因此,研究能有效抑制外部干扰并保护其免受恶意攻击的车载激光雷达,是无人驾驶汽车发展和应用的迫切需求。

近年来,国内外学者提出了三维(3D)脉冲混沌激光雷达^[10]、混沌激光雷达^[11-12]、调频连续波(FMCW)^[13]以及码分复用(CDMA)激光雷达^[14-15]等车载抗干扰激光雷达系统。这些激光雷达都具备较好的抗干扰性能,但也存在一定的缺点:脉冲混沌调制的测距分辨率受脉冲宽度的影响,难以得到较大的提升;混沌信号的产生需要精密昂贵的光注入或光电反馈等器件,易受温度的影响,光源成本较高,且稳定性和可靠性较差;FMCW激光雷达虽然具有较好的抗干扰性能,但易出现带内干扰和过渡干扰,从而降低了系统的最大探测

收稿日期: 2021-08-01; 修回日期: 2021-09-04; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01011200)

通信作者: *xieyingke@cqut.edu.cn

距离并带来鬼影^[13];基于相关测距的光学正交 CDMA 激光雷达^[15]的测距准确性较好,但其相关输出存在较大的旁瓣。近年来,基于跳频的抗干扰技术在雷达和通信领域得到了广泛应用,表现出较好的安全性和稳定性等^[16-17]。因此,本文提出了一种光跳频(LFH)激光雷达系统,并通过仿真与实验研究了该系统对同类型和不同类型激光雷达干扰信号的抵抗能力。

2 LFH 激光雷达系统

研究 LFH 激光雷达抗干扰性能的实验装置如图 1 所示。本振激光经外调制信号控制的电光调制器 (EOM) 调制后产生的一路信号为 LFH 信号,该信号

经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后由准直镜发射至自由空间,调制信号的另一路作为参考信号。发射激光照射在目标物体上的后向散射回波信号与干扰信号同时耦合进入 LFH 激光雷达的接收系统,利用模数转换器(ADC)实时采集数据并送入相关运算单元进行处理,根据参考信号和回波信号的相关曲线峰值位置实现测距。

图 2 为 LFH 激光雷达调制信号的时频图。图 2(a) 为 LFH 激光雷达的原理,图 2(b)为 LFH 激光雷达信号的简单示例。其中,LFH 发射信号的带宽 $B=N \cdot \delta_i$, δ_i 为相邻最小发射频率间隔, N 为跳频点数。

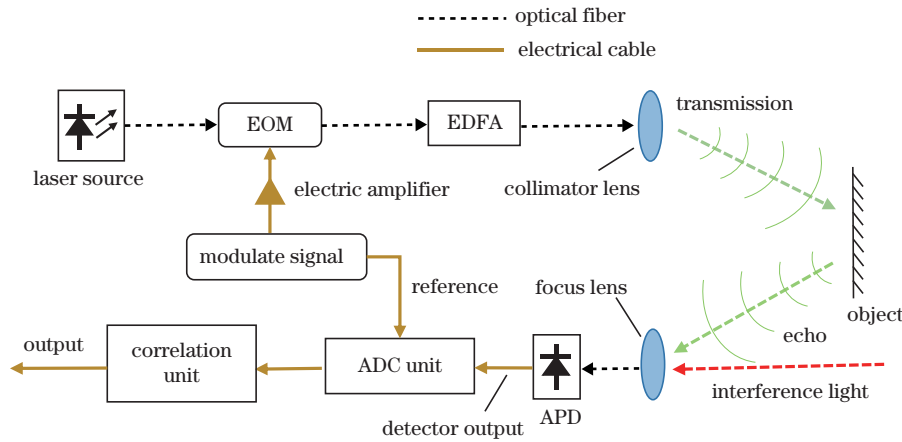


图 1 LFH 激光雷达抗干扰实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the anti-interference experiment setup of the LFH LiDAR

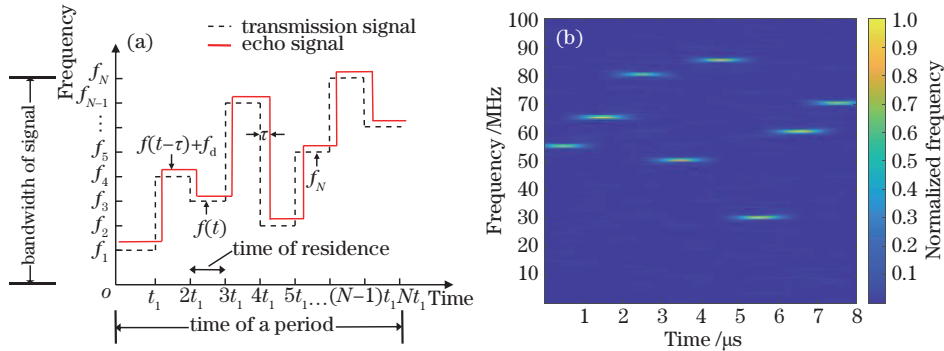


图 2 LFH 激光雷达调制信号的时频图。(a) LFH 的原理; (b) LFH 激光雷达信号

Fig. 2 Time-frequency diagram of modulation signal of the LFH LiDAR. (a) Principle of the LFH; (b) LFH LiDAR signal

LFH 激光雷达的发射频率 f_n 在跳频带宽内随机跳变,其中, $n \in [1, \dots, N]$ 。飞行回波延迟信号为 $f(t - \tau)$, t_1 为每跳驻留时间, f_d 为多普勒频移。不考虑相对运动时可忽略 f_d 的影响。因此,在时间区间 $(n - 1)t_1 < t \leq nt_1$ 内的 LFH 激光雷达发射信号可表示为

$$x_n(t) = \exp(j2\pi f_n t) \quad (1)$$

无干扰时,基于相关测距的 LFH 激光雷达的任意点目标回波信号可能包含 N 个不同频率的后向散射信号,回波信号与参考信号逐一进行相关运算形成

多个点目标的距离相关值,其归一化相关输出^[16]可表示为

$$C(\tau, \tau_{ref}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp[j2\pi f_n (\tau - \tau_{ref})], \quad (2)$$

式中, τ 为真实探测点目标的飞行延迟时间, τ_{ref} 为参考信号的延迟时间。由式(2)可知,当 $\tau = \tau_{ref}$ 时,基于回波信号的相关曲线值最大。当 LFH 激光雷达接收的探测点目标回波信号中包含干扰时,接收回波输出信号数学模型 $x_{rec}(t)$ 可表示为

$$x_{rec}(t) = x_n(t) + x_{int}(t) + x_{noise}(t), \quad (3)$$

式中, $x_n(t)$ 为真实回波信号, $x_{int}(t)$ 为干扰信号, $x_{noise}(t)$ 为包含 LFH 激光雷达 APD 输出的暗电流噪声、热噪声和环境噪声总和。激光雷达之间的相互干扰主要源于激光雷达传感器之间, 式(3)中 $x_{noise}(t)$ 的噪声干扰主要为高斯随机噪声, 其对相关结果的影响

可忽略不计。因此, 式(3)可近似表示为

$$x_{rec}(t) \approx x_n(t) + x_{int}(t), \quad (4)$$

将式(1)中的跳频信号代入式(4)的接收干扰回波输出模型, 得到真实回波信号飞行延时 τ 和干扰信号延时 τ_{int} 后, ADC 的干扰回波信号向量可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{rec}^T = & [\exp(j2\pi f_1 \tau) + \underbrace{\beta \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int}) + \dots + \beta \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int})}_M, \dots, \\ & \exp(j2\pi f_n \tau) + \underbrace{\beta \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int}) + \dots + \beta \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int})}_M] = \\ & [\exp(j2\pi f_1 \tau) + \beta M \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int}), \dots, \exp(j2\pi f_n \tau) + \beta M \exp(j2\pi f_{int} \tau_{int})], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, M 为干扰信号数量, β 为干扰信号强度, f_{int} 为干扰信号频率。跳频参考信号向量可表示为

$$\mathbf{V}_{ref}^T = [\exp(j2\pi f_1 \tau_{ref}), \dots, \exp(j2\pi f_n \tau_{ref})]. \quad (6)$$

结合式(2), 将式(5)与式(6)在跳频每段驻留时间内逐一进行相关运算, 则干扰下的归一化相关结果可表示为

$$C_{int}(\tau, \tau_{int}, \tau_{ref}) = \frac{1}{N} \mathbf{V}_{rec}^T \mathbf{V}_{ref}^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \exp[j2\pi f_n(\tau - \tau_{ref})] + \beta M \exp[j2\pi(f_{int} \tau_{int} - f_n \tau_{ref})] \}, \quad (7)$$

式中, 上标*表示矩阵的共轭。由式(7)可知, 当 $f_{int} \tau_{int} = f_n \tau_{ref}$ 时, 干扰信号对输出结果的影响达到最大。而跳频频率的快速随机变化能抵抗干扰信号的影响, 因此, 光跳频激光雷达被其他干扰信号干扰的概率十分小。

3 结果与讨论

基于上述理论和 LFH 激光雷达系统, 对基于相关检测的 LFH 激光测距和在不同干扰条件下的测距进行了仿真, 仿真时设置的 LFH 激光雷达参数如表 1 所示。无人车载激光雷达的最远探测距离通常大于 150 m, 在 LFH 激光雷达测距仿真中设置的目标位于 20 m 处。根据跳频原理可知, 跳频数越多, 其相对抗干扰能力就越强, 但点数过多时会给器件性能和数据处理能力带来挑战, 综合考虑后, 将跳频数 N 设置为 10000。为使激光雷达在无人驾驶中的最远无模糊探测距离达到 150 m, 仿真中设置每跳驻留等于一次往返飞行时间 $1 \mu\text{s}$ 。若设置每跳驻留时间小于 $1 \mu\text{s}$, 其无模糊探测距离将小于 150 m。每一跳的瞬时带宽近似为每跳驻留时间的倒数, 因此仿真中的最小每跳带宽为 1 MHz。

3.1 LFH 激光雷达仿真

3.1.1 LFH 激光雷达测距

根据式(2), 在 $N = 10000$ 时, 仿真了 LFH 激光雷达对目标位于 20 m 处的相关测距结果, 如图 3 所示。可以发现, 基于相关测距的 LFH 激光雷达可以实现准确测距。

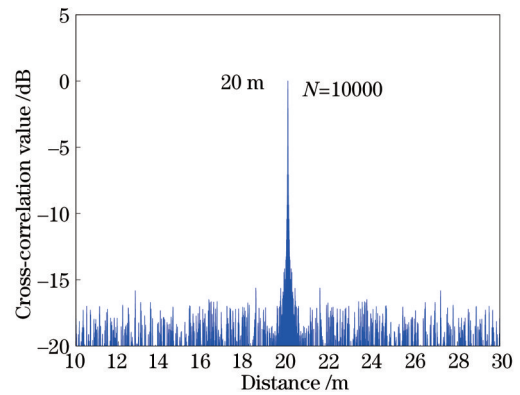


图 3 LFH 激光雷达的测距结果
Fig. 3 Ranging result of the LFH LiDAR

3.1.2 不同干扰类型下的仿真结果

根据式(7), 在不同干扰条件下, 对 LFH 激光雷达测距准确性进行了仿真分析。干扰强度、数量分别为 $\beta = 1, M = 1$, $\beta = 1, M = 3$ 和 $\beta = 4, M = 2$ 时 LFH 激光雷达在同类型 LFH 雷达干扰下的相关测距结果分别如图 4(a)~图 4(c)所示。可以发现, LFH 激光雷达相关输出峰值在上述干扰条件下清晰准确。虽然干扰数量或强度的改变会导致相关输出噪声基底增大, 但这并不影响其在干扰下的测距结果准确性。这表明其测距结果准确性在不同干扰数量和强度的同类型干扰影响下不变。

表 1 LFH 激光雷达的仿真参数

Table 1 Simulation specifications of the LFH LiDAR

Specification	Value
Range / m	20
Points of frequency-hopping	10000
Bandwidth of frequency-hopping / GHz	10
Residence time per hop / μs	1
Spacing of frequency-hopping / MHz	1
Hopping period / ms	10

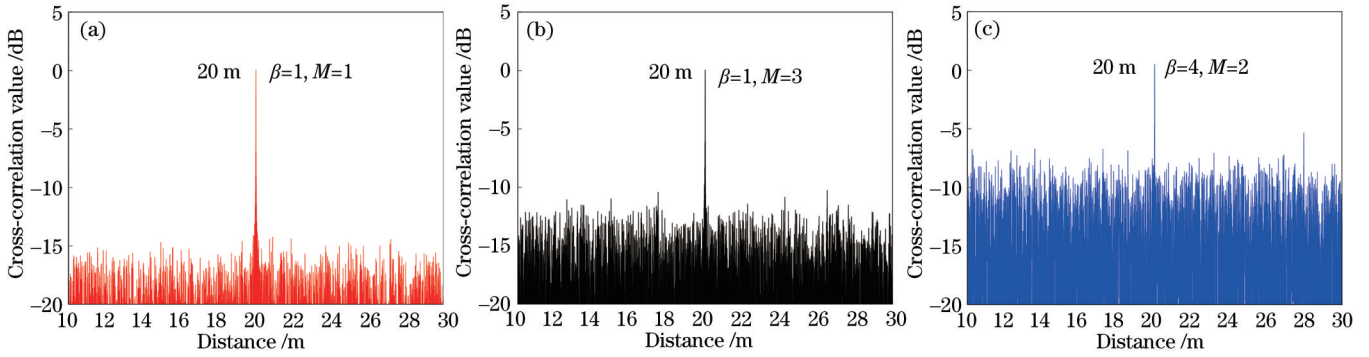


图 4 LFH激光雷达在同类型雷达干扰下的测距结果。(a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

Fig. 4 Ranging results of LFH LiDAR with same type interference. (a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

干扰强度、数量分别为 $\beta=1, M=1$ 、 $\beta=1, M=3$ 和 $\beta=4, M=2$ 时 LFH 激光雷达在脉冲激光雷达干扰下的相关测距结果分别如图 5(a)~图 5(c) 所示。可以发现,在上述干扰条件下,LFH 激光雷达的测距结

果准确性未受影响。虽然脉冲干扰数量和强度的改变造成了相关输出噪声基底增大,但并不会影响其测距准确性。这表明该系统对不同干扰数量和强度的脉冲信号具有较强的抵抗能力。

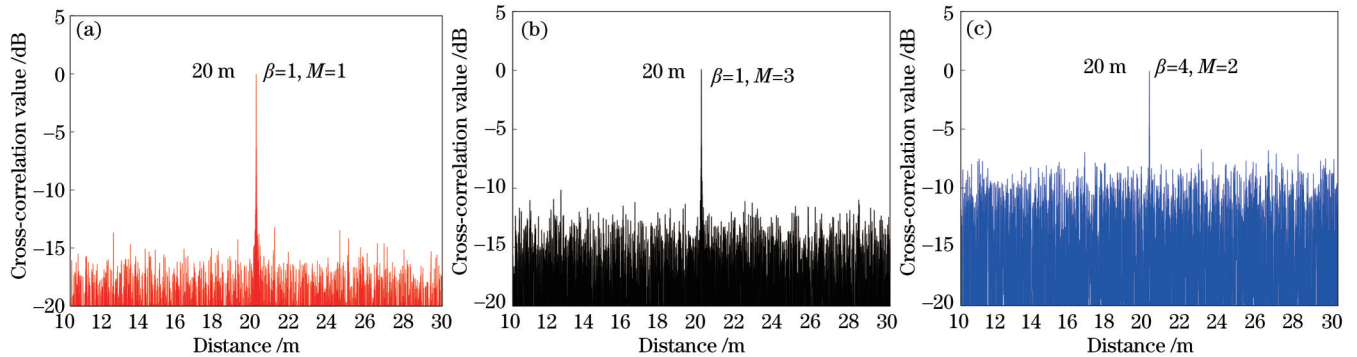


图 5 LFH激光雷达在脉冲激光雷达干扰下的测距结果。(a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

Fig. 5 Ranging results of LFH LiDAR with pulse LiDAR interference. (a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

干扰强度、数量分别为 $\beta=1, M=1$ 、 $\beta=1, M=3$ 和 $\beta=4, M=2$ 时 LFH 激光雷达在 FMCW 激光雷达干扰下的相关测距结果分别如图 6(a)~图 6(c) 所示。可以发现,不同干扰强度和数量的 FMCW 激光雷达干扰信号下的相关输出峰值清晰,测距结果准确。虽然干扰数量和强度的改变导致相关输出噪声基底增大,但并未影响其测距结果准确性。

干扰强度、数量分别为 $\beta=1, M=1$ 、 $\beta=1, M=3$ 和 $\beta=4, M=2$ 时 LFH 激光雷达在 CW 激光雷达干扰下的相关测距结果分别如图 7(a)~图 7(c) 所示。可以发现,在不同数量和强度的 CW 干扰下,LFH 激光相关输出峰值清晰,测距结果准确。虽然干扰强度和数量的增加导致噪声基底增加,但其测距结果准确性依旧未受影响,这也表明其测距结果准确性不受 CW

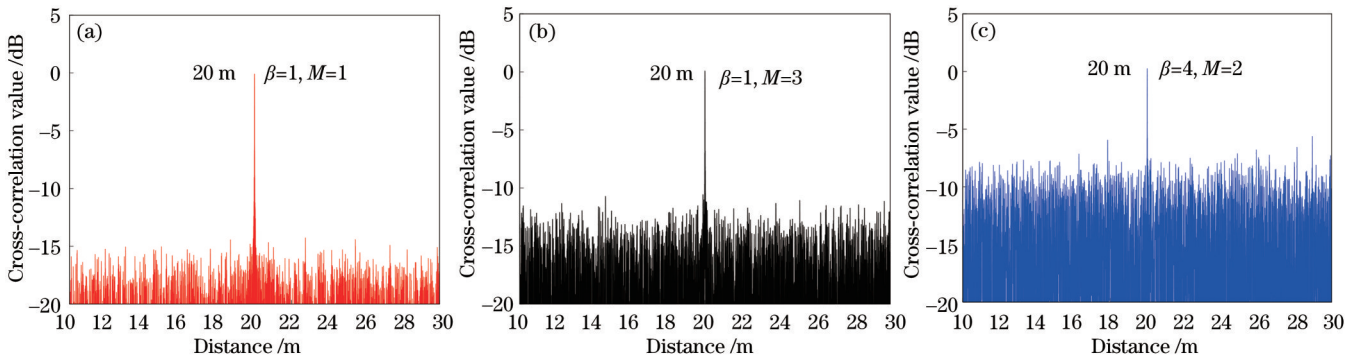


图 6 LFH在 FMCW 激光雷达干扰下的测距结果。(a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

Fig. 6 Ranging results of LFH LiDAR with FMCW LiDAR interference. (a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

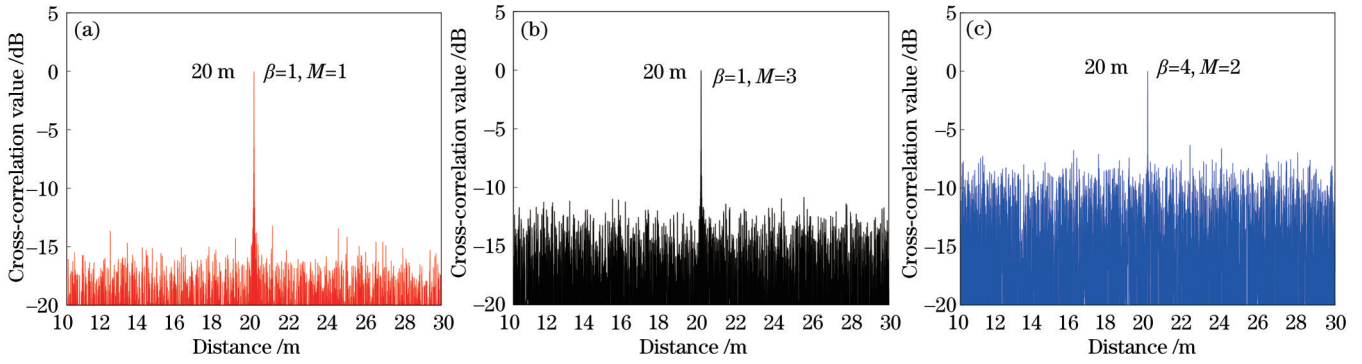


图 7 LFH在CW激光雷达干扰下的测距结果。(a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

Fig. 7 Ranging results of LFH LiDAR with CW LiDAR interference. (a) $\beta=1, M=1$; (b) $\beta=1, M=3$; (c) $\beta=4, M=2$

干扰信号强度与数量的影响。

综上所述,在各种干扰的影响下,LFH激光雷达的测距结果准确性均未受到影响。虽然干扰数量和强度的增加导致了噪声基底增大,但并不会影响其测距结果准确性。这表明LFH激光雷达在上述干扰下均能表现出稳定可靠的测距结果,具备良好的抗干扰性能。

3.2 跳频激光雷达抗干扰实验

基于上述理论、光跳频激光雷达系统与仿真结果,搭建了光跳频激光雷达实验系统,通过干扰实验中测距相对误差 δ 的大小表征光跳频激光雷达的抗干扰性能。在干扰实验中,光跳频激光雷达系统的本振光源由波长和输出功率均可调谐的激光器(北京科威公司 EXFO, OSICS 系列)产生波长为 1550 nm、输出功率为 10 mW 的不可见光。跳频调制电信号使用 Agilent 生产的型号为 KEYSIGHT M9502A 且最大采样率为 12 GSa/s 的任意波形发生器(AWG)产生。用其控制 EOM 产生跳频调制的激光,外调制跳频激光的光功率经 EDFA 放大为 20 dBm,再经准直镜发送至自由空间。受限于实验条件,实验中 LFH 信号的跳频数 $N=100$,跳频信号带宽为 100 MHz,每跳持续时间 $t_1=1 \mu\text{s}$ 。由被探测物体后向散射的回波经聚焦透镜聚焦

后被带宽为 150 MHz 的铟镓砷 APD 检测。当存在干扰信号时,理想回波信号与干扰信号共同耦合进入 APD,并将输出电信号送入最大带宽为 30 GHz,最大采样率为 80 GSa/s 的示波器(美国力科公司 WaveMaster 830Zi-B 型号)进行实时采样。

实验研究了在三种不同 CW 激光雷达干扰频率(固定频率为 25 MHz, 50 MHz 和 75 MHz)、16 线商业脉冲激光雷达、FMCW 激光雷达和同类型激光雷达干扰下,LFH 激光雷达的相关测距结果准确性。图 8 为干扰实验中使用的深圳速腾聚创公司生产的 16 线脉冲商业激光雷达、PurePhotonics 公司的 PPCL300 系列低噪声可调谐 FMCW 激光雷达以及搭建的实验装置。

干扰实验中,分别测量了 6 组在不同体制干扰下的距离,并分析了其相关测距的相对误差 δ 。表 2 为 LFH 激光雷达在各种干扰源下的测距结果与测距相对误差分析。其中, R 和 M 分别为目标的实际距离和测量距离。可以发现,在干扰下的最大测距相对误差 δ 绝对值不超过 1.5%,这表明采用相关测距方式的 LFH 激光雷达能较大程度地降低干扰源对测距结果准确性的影响,验证了基于相关测距的跳频激光雷达具备良好的抗干扰性能。

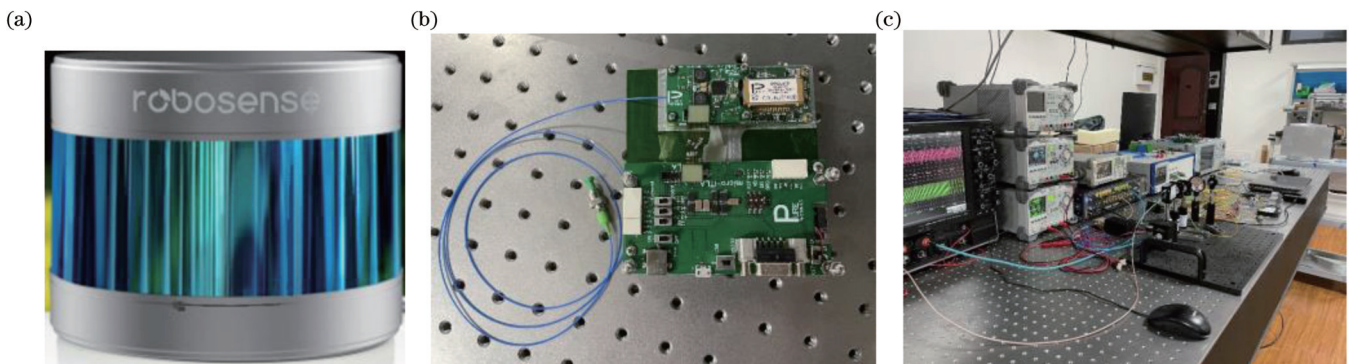


图 8 干扰实验。(a) 16 线商业脉冲激光雷达; (b) 低噪声可调谐 FMCW 激光雷达; (c) 实验装置

Fig. 8 Experiment of interference. (a) 16-lines commercial pulse LiDAR; (b) low noise and tunable FMCW LiDAR; (c) experiment setup

表 2 不同干扰源影响下的 6 组不同距离的测距结果与测距相对误差

Table 2 Measuring results of six different distance with different interference sources and the relative error of distance measuring

Interference type	No. 1 /m		No. 2 /m		No. 3 /m		No. 4 /m		No. 5 /m		No. 6 /m		$\delta / \%$
	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	
CW(25 MHz)	1.99	1.98	2.27	2.28	3.15	3.14	3.50	3.51	2.99	3.00	2.70	2.72	± 0.8
CW(50 MHz)	1.99	1.99	2.27	2.29	3.15	3.13	3.50	3.51	2.99	3.00	2.70	2.71	± 0.9
CW(75 MHz)	1.99	1.98	2.27	2.27	3.15	3.15	3.50	3.50	2.99	3.00	2.70	2.72	± 0.7
Pulse	1.99	1.98	2.27	2.28	3.15	3.14	3.50	3.51	2.99	3.01	2.70	2.71	± 0.7
FMCW	1.99	1.98	2.27	2.28	3.15	3.15	3.50	3.52	2.99	3.01	2.70	2.72	± 0.7
LFH	1.57	1.56	2.27	2.27	2.48	2.46	3.50	3.51	2.99	3.00	2.70	2.74	± 1.5

4 结 论

提出了一种基于相关测距方法的跳频调制车载激光雷达系统,并通过仿真与实验分析了 LFH 激光雷达的抗干扰性能。结果表明,LFH 激光雷达的测距准确性不受常见干扰激光雷达干扰数量和强度的影响,不同干扰条件实验下的相对测量误差 δ 不大于 1.5%。这表明 LFH 激光雷达具备良好的抗干扰性能。这些结果对发展车载抗干扰激光雷达具有重要的意义,同时也为未来大规模、交叉应用场景中激光雷达的抗干扰研究提供一个新的可行性技术方案。

参 考 文 献

- [1] 徐国权, 张一帆, 万建伟, 等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.
Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [2] 钱立勇, 吴德成, 周晓军, 等. 高光谱成像激光雷达系统辐射定标和地物信息获取[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1128001.
Qian L Y, Wu D C, Zhou X J, et al. Radiation calibration and ground object information acquisition based on high spectral imaging lidar system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1128001.
- [3] Hecht J. Lidar for self-driving cars[J]. Optics and Photonics News, 2018, 29(1): 26-35.
- [4] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2016: 1271-1278.
- [5] Maturana D, Scherer S. VoxNet: a 3D convolutional neural network for real-time object recognition[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 28-October 2, 2015, Hamburg, Germany. New York: IEEE Press, 2015: 922-928.
- [6] Diehm A L, Hammer M, Hebel M, et al. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10796: 1079604.
- [7] Brooker G M. Mutual interference of millimeter-wave radar systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(1): 170-181.
- [8] Kim G, Eom J, Park Y. Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners[C]//2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 28-July 1, 2015, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2015: 437-442.
- [9] Hwang I P, Yun S J, Lee C H. Study on the frequency-modulated continuous-wave LiDAR mutual interference [C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology, October 16-19, 2019, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2019: 1053-1056.
- [10] Cheng C H, Chen C Y, Chen J D, et al. 3D pulsed chaos lidar system[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 12230-12241.
- [11] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(5): 991-997.
- [12] 王冰洁, 钱建军, 赵彤, 等. 混沌激光雷达抗干扰性能分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514002.
Wang B J, Qian J J, Zhao T, et al. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0514002.
- [13] Hwang I P, Yun S J, Lee C H. Mutual interferences in frequency-modulated continuous-wave (FMCW) LiDARs [J]. Optik, 2020, 220: 165109.
- [14] Fersch T, Weigel R, Koelpin A. A CDMA modulation technique for automotive time-of-flight LiDAR systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(11): 3507-3516.
- [15] 梁恒恒, 王晰晨, 陈永龙, 等. CDMA 调制激光雷达抗干扰性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 1228005.
Liang H H, Wang X C, Chen Y L, et al. Anti-interference performance of CDMA modulated lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(12): 1228005.
- [16] Axelsson S R J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(4): 890-904.
- [17] 祝宁华, 陈伟, 刘建国. 一种全新的光通信保密机制: 光跳频[J]. 网络新媒体技术, 2012, 1(6): 70-72.
Zhu N H, Chen W, Liu J G. A band new security mechanism of fibre communications-lightwave hopping communication[J]. Journal of Network New Media, 2012, 1(6): 70-72.