

码分多址调制激光雷达抗干扰性能分析

梁恒恒¹, 王晰晨², 陈永龙², 张俊安¹, 谢瑛珂^{3*}

¹重庆理工大学两江人工智能学院, 重庆 401120;

²重庆理工大学两江国际学院, 重庆 401120;

³重庆理工大学理学院, 重庆 401320

摘要 激光雷达(LiDAR)抗干扰技术是实现安全无人驾驶的核心技术之一。分析了码分多址(CDMA)调制激光雷达系统的原理,比较了不同正交码组的特性,并通过仿真分析了该激光雷达在不同干扰下的抗干扰性能。实验结果表明,采用光正交码(OOC)的CDMA调制激光雷达具有较低的虚警率,可以有效抵抗传统单脉冲激光雷达干扰、同体制激光雷达干扰和较低功率、特定频率的调频连续波(FMCW)激光雷达干扰。此外,针对200个传统单脉冲激光雷达作为密集干扰源的场景,CDMA调制激光雷达的虚警率仅为0.11%,可以满足大规模无人驾驶应用中的抗干扰要求。

关键词 激光雷达; 激光测距; 抗干扰; 码分多址调制; 光正交码

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1228005

Anti-Interference Performance Analysis of Modulated Light Detection and Ranging Using Code Division Multiple Access

Liang Hengheng¹, Wang Xichen², Chen Yonglong², Zhang Junan¹, Xie Yingke^{3*}

¹School of Artificial Intelligence, Chongqing University of Technology, Chongqing 401120, China;

²Liangjiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401120, China;

³College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 401320, China

Abstract The anti-interference properties of the light detection and ranging (LiDAR) technology is a core aspect for realizing safe unmanned driving. Herein, the principle of modulated LiDAR system using code division multiple access (CDMA) is analyzed, the characteristics of different orthogonal code groups are compared, and the anti-interference performance of the CDMA-modulated LiDAR system is analyzed under different interferences by simulation. Experimental results show that the CDMA-modulated LiDAR system based on the optical orthogonal code (OOC) achieves a low false-alarm rate and can effectively resist the interference of conventional single-pulse LiDAR systems. Furthermore, it can effectively resist the same LiDAR system and the interference of the frequency-modulated continuous wave (FMCW) LiDAR system with low power and a specific frequency. Moreover, for 200 scenes where conventional monopulse LiDAR is used as the dense interferer, the false alarm rate of the CDMA-modulated LiDAR system is only 0.11%, which can meet the anti-interference requirements of large-scale unmanned applications.

Key words LiDAR; laser ranging; anti-interference; code division multiple access modulation; optical orthogonal code

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-06-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01011200)

通信作者: *xieyingke@cqut.edu.cn

1 引言

激光雷达(LiDAR)具有探测精度高、速率快等优点,可提供密集、精确的三维点云信息,是实现无人驾驶的核心传感器之一^[1]。但实际应用表明,车载激光雷达之间的相互干扰和外部蓄意入侵干扰会导致激光雷达传感器无法正确识别行人、车辆等物体,给无人驾驶带来极大的安全隐患^[2-3]。因此,随着无人驾驶汽车的高速发展和普及,车载激光雷达抗干扰技术已成为国内外学者和相关设备厂商争相研究的关键技术之一,具有重要的科学意义和迫切的应用需求^[4-8]。

近些年来,国内外学者提出了基于伪随机调制^[9-11]或混沌调制^[12-15]的车载激光雷达抗干扰技术,达到了一定的抗干扰效果。但是由于激光人眼安全功率限制,伪随机调制使脉冲的峰值功率降低,最大探测距离减小,且信号调制时间长,导致测距点偏移、角分辨率降低。而混沌信号的调制需要精密且昂贵的光反馈器件和注入激光器等设备,对温度和环境的要求很高,在车载环境下可靠性、稳定性差。与之相比,基于码分多址(CDMA)调制的车载激光雷达^[16]可以保持激光脉冲的高峰值功率以保证测距精度和最大测距距离,相关性检测结果亦具有明显的峰值。同时,基于现有成熟的脉冲激光雷达技术进行CDMA调制可简化系统结构,提高系统集成度和稳定性。基于此,本文在分析了CDMA调制激光雷达工作原理的基础上,重点对CDMA调制的车载激光雷达的抗干扰性能进行了仿真研究。

2 CDMA调制激光雷达基本原理

CDMA调制激光雷达系统原理如图1所示。在发射端基于正交码对激光脉冲进行调制,得到周期性多脉冲激光信号,每个周期内脉冲编码长度为 N ,多脉冲激光经过光学系统和扫描系统扫描出射,并记录脉冲编码中心位置对应时刻为出射时刻 t_1 。在接收端,回波信号经过光学系统,最后由雪崩光电二极管(APD)接收并转换为电信号后放大输出,经模/数(A/D)转换器后得到数字信号,并进入数据处理模块,在数据处理模块中进行阈值判决和滑动相关检测操作。阈值判决的作用类似于光纤通信中的光限幅器^[17],以激光雷达最大探测距离对应的最小回波强度为判定阈值,将数字信号判决为“0”或“1”,可以消除信号混叠的影响,减小多址干扰。完成阈值判决后,对阈值判决结果进行滑动相关检测,即

$$SC[t] = \sum_{m=1}^N x[t+m] \cdot C[m], \quad (1)$$

式中: $SC[t]$ 表示 t 时刻滑动相关值; x 为接收信号阈值判决后的结果; C 为系统选择的正交码字; N 为码长。得到滑动相关结果后再对其进行判断,若 $SC[t] = w$ (w 为正交码码重),则 t 时刻为CDMA调制激光雷达自身回波信号的中心时刻,记为 t_2 ,探测目标的距离 $R = c \cdot \frac{t_2 - t_1}{2}$, c 为光速;若 $SC[t] = 1$ 或 $SC[t] = 0$,表明 t 时刻回波信号为干扰信号或者 t 时刻不为系统自身回波信号的中心时刻。利用正交码的相关特性,通过对滑动相关值的判断,CDMA调制激光雷达可以实现抗干扰和准确测距。

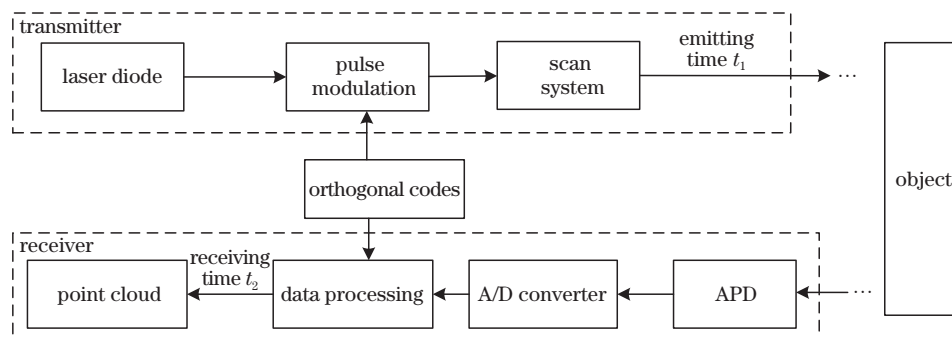


图1 CDMA调制激光雷达原理图

Fig. 1 Schematic of CDMA modulated LiDAR

CDMA系统的实现以扩频技术为基础。在发射端,CDMA编码器将“1”按照正交码扩展为多脉冲序列,“0”扩展为相同长度的0序列。在接收端,解码器根据同一正交码对接收到的回波信号进行

解扩以恢复数据信息。CDMA系统抗干扰的关键在于地址码(正交码)的优秀正交性,实际应用中也需要考虑码重、码组容量等因素的影响。常用的正交码包括伪随机(PN)序列码^[4]、素数码(PC)^[18]和

光正交码(OOC)^[19]。本实验组对码长为 31、码重为 16 的伪随机 m 序列,码长为 25、码重为 5 的素数码

和码长为 31、码重为 3 的光正交码进行了比较,3 种码组如表 1 所示。

表 1 正交码组
Table 1 Orthogonal code sets

No.	m sequence	PC sequence	OOC sequence
C ₁	1000010101110110001111100110100	1000010000100001000010000	11000001000000000000000000000000
C ₂	1000010010110011111000110111010	1000001000001000001000001	10100000000100000000000000000000
C ₃	10000110010011111101110001010110	1000000100000010100000010	10010000000000010000000000000000
C ₄	1000011010100100010111110110011	1000000010010000000100100	10001000000000100000000000000000
C ₅	1000011100110111110100010010101	1000000001000100010001000	10000100000001000000000000000000
C ₆	1000010110101000111011111001001		

以各码组中的 C₃ 码字对其他码字进行相关性检测,归一化检测结果如图 2 所示,其中 θ_{m-n} 代表 C_m 与 C_n 的相关性结果。从图 2 可以看出:归一化后 m 码组、PC 码组和 OOC 码组的自相关(m=n)最大峰值都为 1,自相关最大旁瓣值分别为 0.50,

0.80, 0.33; 互相关(m≠n)最大峰值分别为 0.625, 0.400, 0.333。在应用中,码字间的互相关最大峰值和自相关最大旁瓣值越小,其正交性越好,因此 OOC 码组的正交性明显优于 m 码组和 PC 码组。

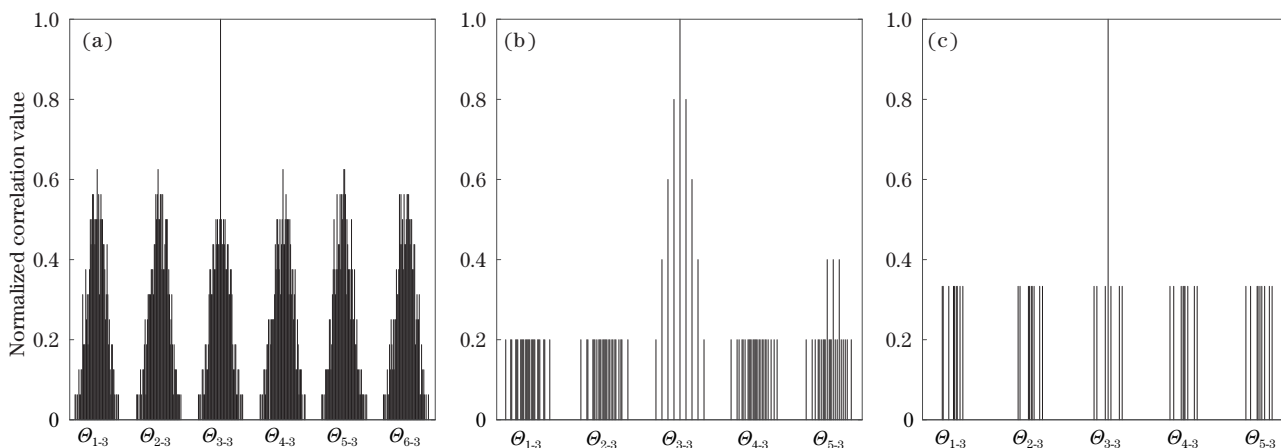


图 2 不同码组的相关特性。(a) m 码组;(b)PC 码组;(c) OOC 码组

Fig. 2 Correlation characteristics of different code sets. (a) m codes; (b) PC codes; (c) OOC codes

进一步探究不同信噪比(SNR)下使用不同码组的 CDMA 调制激光雷达的探测虚警率。分别以 PN、PC 和 OOC 3 种码组进行调制,加入不同信噪比的高斯白噪声模拟回波信号,通过判断自相关峰值进行解调,得到的虚警率随信噪比的变化如图 3 所示。从图中可以看出,PN 码的误码率最低,OOC 次之,PC 码的误码率最高。但是 PN 码码重($w=16$)远大于 OOC 的码重($w=3$),而在激光脉冲编码中,受到激光人眼安全标准^[20]的限制,大码重会降低脉冲峰值,减小最大探测距离。因此,综合考虑各方面因素,OOC 码组性能最佳,本实验组以 OOC 码组作为 CDMA 调制激光雷达的正交码组。

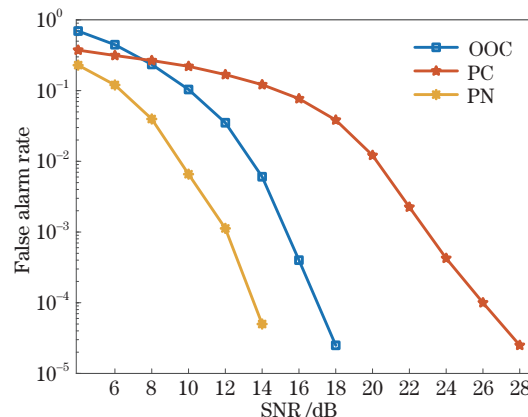


图 3 各码组对应的虚警率随信噪比的变化

Fig. 3 Variation of false alarm rates corresponding to each code group with SNR

3 仿真结果及分析

仿真中,CDMA 调制激光雷达均以 (31, 3, 1) OOC 码组 C_3 码字为正交码,激光脉冲宽度为 1 ns,探测周期为 4 us。基于激光雷达回波信号能量公式为

$$P_R = P_T \frac{\pi \tau_o \tau_A^2 D_R^2 \rho}{4R^2}, \quad (2)$$

式中: P_R 为接收信号功率; P_T 为发射信号功率; τ_o 为光学传输系数; τ_A 为大气传输系数; D_R 为接收孔径; ρ 为目标表面反射率; R 为探测距离。 τ_o 和 D_R 取决于系统光路, τ_A 、 ρ 和 R 为变化值,取决于所处环境和被探测物体。一般情况下,近红外激光在能见度为 2.5 km(轻雾)和 20 km(晴朗)下的大气传输系数分别为 0.480 和 0.707^[21],且大多数物体表面反射率介于 20% 和 80% 之间。为简化分析,在仿真中以 0.480 和 0.707 为大气传输系数的最小和最大值,即 $0.480 < \tau_A < 0.707$,并设定目标表面反射率在 [20%, 80%],在测距范围设定为 [1 m, 100 m] 的情况下, $\tau_A = 0.480$ 、 $\rho = 20\%$ 、 $R = 100$ m 时,回波信号功率最小, $\tau_A = 0.707$ 、 $\rho = 80\%$ 、 $R = 1$ m 时,回波信号功率最大。以最大功率回波的响应为 1 进行分析,为了实现对最小功率回波信号的探测,设置仿真实验的阈值 $D_{Th} = (0.480^2 \times 0.2) / (0.707^2 \times 0.8 \times 100^2) = 0.115/100^2$ 。综上所述,CDMA 调制激光雷达的各项仿真参数如表 2 所示,且由于激光

表 2 CDMA 调制激光雷达仿真参数
Table 2 Simulation specifications of CDMA modulated LiDAR

Parameter	Value
Range	100 m @20% reflectivity
Rate / (point·s ⁻¹)	250000
Period / us	4
Pulse width / ns	1
Orthogonal code	$C_3(10010000000000001000000000000000)$
Atmospheric transmission	0.480-0.707
Target surface reflectivity	20%-80%
Threshold (normalized)	0.115/100 ²
Detection method	Sliding correlation

人眼安全标准限制,所有类型激光雷达的激光发射功率设定为相同的。

3.1 无干扰测距

图 4 为 CDMA 调制激光雷达无干扰测距的仿真结果,[图 4(a)]中为目标距离为 30 m 的回波信号,[图 4(b)]为 C_3 码字与回波阈值检测结果的滑动相关曲线。从[图 4(b)]可以看出,互相关曲线具有明显的峰值和对称分布的旁瓣,峰值与旁瓣值比为 $w:1$ [图 4(b)中 $w=3$],峰值位于 200 ns 处,表明发射信号与回波信号延迟为 200 ns,距离为 30 m,与回波信号的预设距离相符。

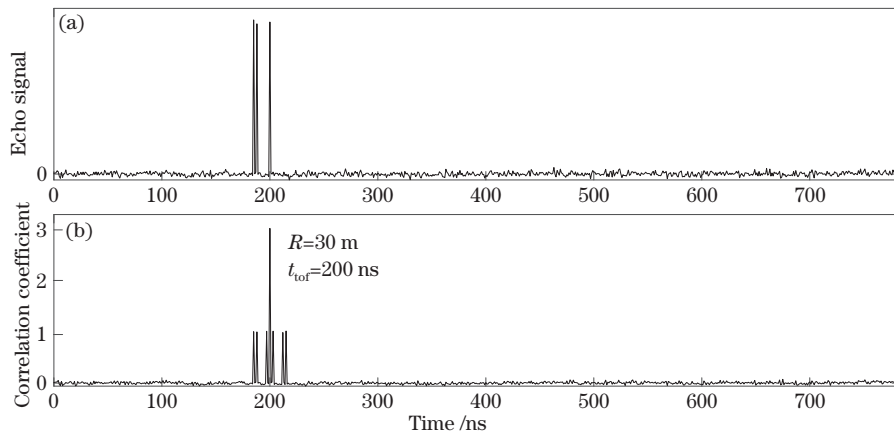


图 4 无干扰测距仿真结果。(a)回波信号;(b) C_3 码字滑动相关检测结果

Fig. 4 Simulation result of ranging without interference. (a) Echo signal; (b) correlation result of C_3 code and echo signal

3.2 传统单脉冲激光雷达干扰

图 5 为在传统单脉冲激光雷达干扰下 CDMA 调制激光雷达测距的仿真结果。[图 5(a)]为 APD 接收到的信号波形,其中 S_{Echo} 为系统自身回波信号, $S_{11} \sim S_{16}$ 为强度不同,时域均匀分布(便于观察,

实际在时域是随机分布的)的单脉冲干扰信号, $S_{11}:S_{12}:S_{13}:S_{14}:S_{15}:S_{Echo}:S_{16}=3.5:3:2:1.5:1:1:0.5$,功率比 $P_1:P_2:P_3:P_4:P_5:P_{Echo}:P_6=12.25:9:4:2.25:1:3:0.25$:[图 5(b)]为接收信号经过阈值判决后的结果:[图 5(c)]为 C_3 码字与阈值检测结果的滑动相

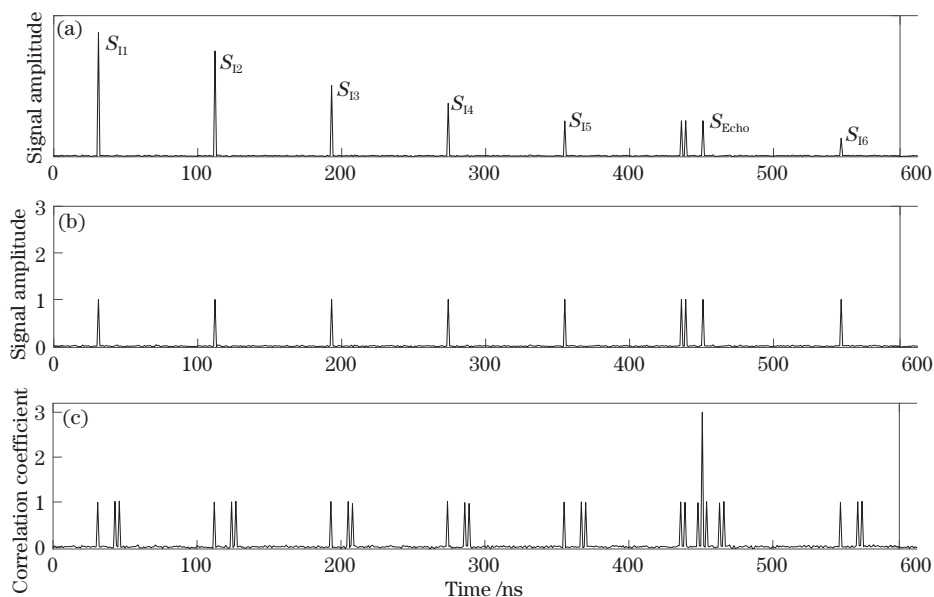


图 5 传统单脉冲激光雷达干扰仿真。(a)接收端信号;(b)阈值检测结果;(c) C_3 码字滑动相关检测结果
 Fig. 5 Simulation of legacy single pulse LiDAR interfering. (a) Received signal; (b) result of threshold detection;
 (c) slide correlation result of C_3 code

关曲线,不同强度干扰信号对应的滑动相关检测结果峰值均为 1,在系统自身回波信号对应的滑动相关检测结果中,6 个值为 1 的旁瓣对称分布,最大峰值为 3,与干扰信号滑动相关检测结果峰值比为 3:1。比较相关峰值大小,峰值为 3 判定为自身回波信号,峰值小于 3 判定为干扰信号。从[图 5(c)]可以清晰判断出系统自身回波信号,并根据峰值得出接收时

刻。上述结果表明,CDMA 调制激光雷达能有效抵抗传统单脉冲激光雷达的干扰,且由于阈值检测判决的限幅作用,干扰信号强度变化不影响自身回波信号的相关曲线最大峰值的准确提取。

3.3 CDMA 调制激光雷达干扰

图 6 为 CDMA 调制激光雷达干扰下测距仿真结果。CDMA 调制干扰激光雷达使用相同 (31, 3, 1)

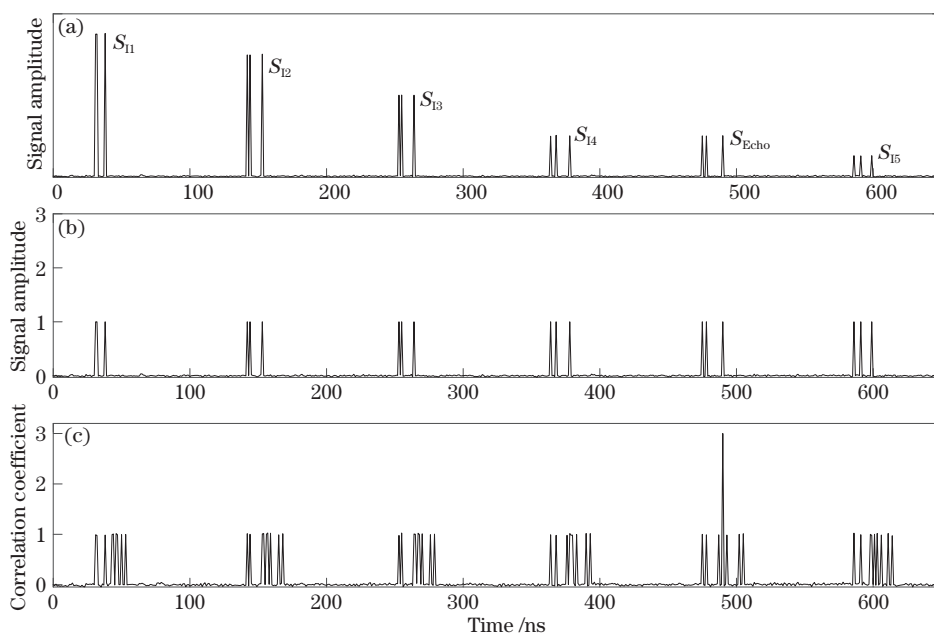


图 6 CDMA 调制激光雷达干扰仿真。(a)接收端信号;(b)阈值检测结果;(c) C_3 码字滑动相关检测结果
 Fig. 6 Simulation of CDMA modulated Lidar interfering. (a) Received signal; (b) result of threshold detection;
 (c) slide correlation result of C_3 code

OOC 码组, [图 6(a)] 为 APD 接收到的信号波形, 其中 S_{Echo} 为采用 C_3 码字调制的自身回波信号, $S_{11} \sim S_{15}$ 是以 C_1, C_2, C_4 和 C_5 不同码字调制强度不同的干扰信号, 强度比 $S_{11}:S_{12}:S_{13}:S_{14}:S_{Echo}:S_{15}=3.5:3:2:1:1:0.5$, 功率比 $P_1:P_2:P_3:P_4:P_{Echo}:P_5=12.25:9:4:1:1:0.25$; [图 6(b)] 为接收信号经阈值检测的结果; [图 6(c)] 为 C_3 码字与阈值检测结果的滑动相关曲线, 不同强度干扰信号对应的滑动相关检测结果最大峰值均为 1, 而系统自身回波信号对应的滑动相关检测结果中, 6 个值为 1 的旁瓣对称分布, 最大峰值为 3, 与干扰信号的相关检测结果峰值比为 3:1。同样, 在 [图 6(c)] 中通过比较峰值大小可以清晰判断出系统的回波信

号。上述结果表明, CDMA 调制激光雷达对相同类型激光雷达也具有好的抗干扰能力, 且干扰信号强度变化不会影响抗干扰性能。

3.4 调频连续波(FMCW)激光雷达干扰

调频连续波激光雷达通过发射调制频率线性变化的正弦波激光信号进行测距。[图 7(a)] 为频率变化为三角波的 FMCW 信号, 频率范围为 [5 MHz, 2 GHz], 周期为 20 us, 调频斜率为 1.995×10^{14} Hz/s。[图 7(b)] 是与 FMCW 信号功率相等的 CDMA 信号波形, 信号的峰值比约为 1:26。

图 8 为 FMCW 激光雷达干扰下仿真结果。FMCW 信号频率随时间不断变化, 为分析 FMCW

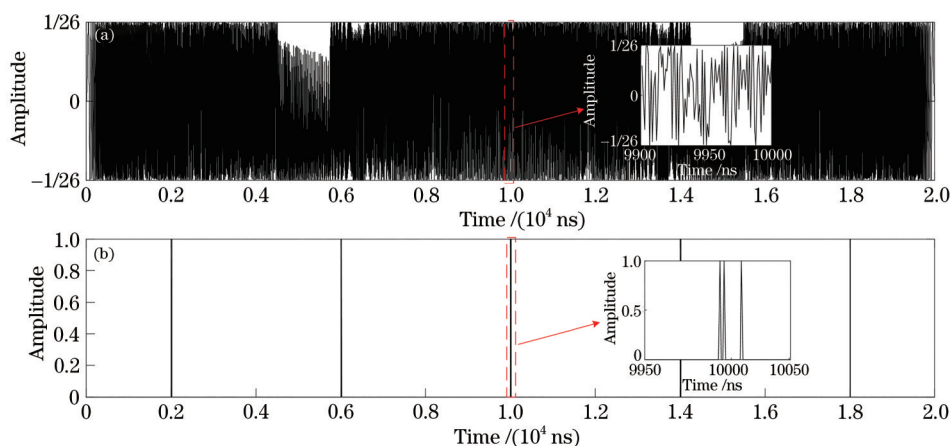


图 7 功率相同 FMCW 信号和 CDMA 信号。(a) FMCW 激光雷达信号; (b) CDMA 调制激光雷达信号

Fig. 7 FMCW signal and CDMA signal of equal power. (a) FMCW LiDAR signal; (b) CDMA modulated LiDAR signal

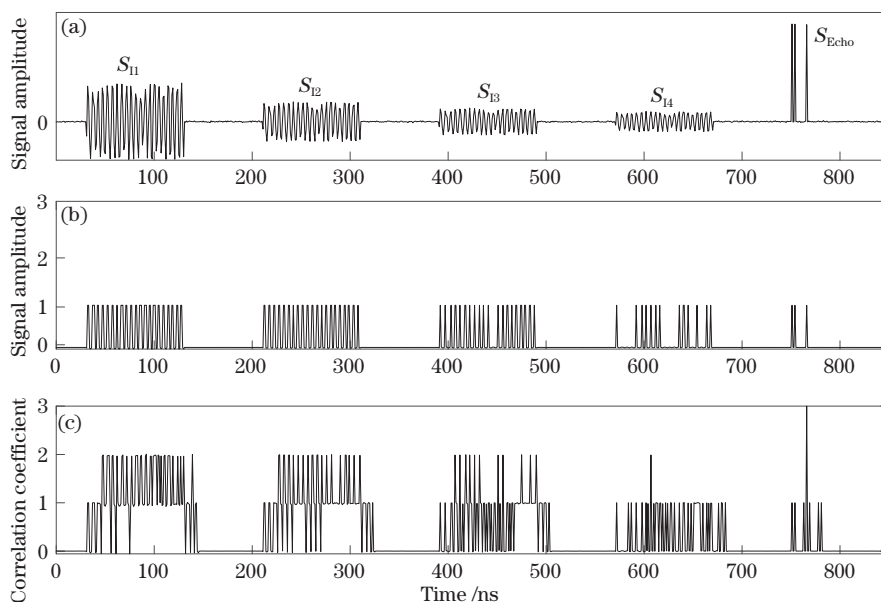


图 8 FMCW 激光雷达干扰仿真。(a) 接收端信号; (b) 阈值检测结果; (c) C_3 码字滑动相关检测结果

Fig. 8 Simulation of FMCW Lidar interfering. (a) Received signal; (b) result of threshold detection; (c) slide correlation result of C_3 code

干扰信号强度的影响,仿真中将 FMCW 干扰信号中心频率设定为 1 GHz。[图 8(a)]为 APD 接收到的信号波形,其中 S_{Echo} 为系统自身回波信号, $S_{11} \sim S_{14}$ 为频率为 1 GHz,时域长度为 100 ns,信号强度不同的 FMCW 干扰信号,强度比 $S_{11}:S_{12}:S_{13}:S_{14}=1/26:1/50:1/75:1/100$,功率比 $P_1:P_2:P_3:P_4=14.79:4:1.78:1$; [图 8(b)]为多个值为 1 的阈值检测结果; [图 8(c)]为 C_3 码字与阈值检测结果的滑动相关曲线,干扰信号对应的滑动相关结果最大幅值为 2,且幅值为 2 的峰值随着干扰信号强度较小变稀疏,噪声基底减小,说明 CDMA 调制激光雷达的抗干扰性能会随着 FMCW 干扰信号的强度增大而减弱。

进一步探究 FMCW 干扰信号频率和调频斜率对 CDMA 调制激光雷达的干扰影响,在图 8 的基础

上,选择固定的强度后,改变干扰信号的中心频率,结果如[图 9(a)]所示,从左到右对应的中心频率分别为 0.4,0.8,1.2,1.6,2 GHz。从图中可以看出,中等频率处噪声基底较小,频率较小和频率较大时噪声基底较大,CDMA 调制激光雷达的抗干扰性能会受到 FMCW 干扰信号频率的影响。之后,在强度和中心频率相同的条件下,改变每段 FMCW 信号的调频斜率,结果如[图 9(b)]所示,从左到右的调频斜率分别为 1.495×10^{14} , 1.995×10^{14} , 2.495×10^{14} , 2.995×10^{14} Hz/s。从图中分析可知,不同调频斜率对应的滑动检测结果噪声基底几乎相同,因此调频斜率对 CDMA 调制激光雷达的抗干扰性能几乎无影响。由此可以得出结论,CDMA 调制激光雷达对较低功率或特定频率的 FMCW 干扰信号有较好的抗干扰能力。

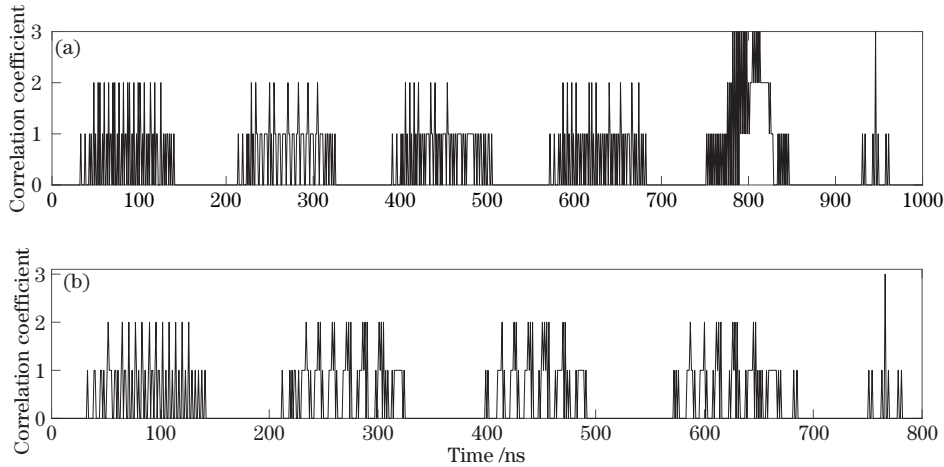


图 9 不同 FMCW 干扰信号对应干扰结果。(a)不同中心频率 FMCW 信号的干扰结果;(b)不同调频斜率 FMCW 信号的干扰结果

Fig. 9 Interference results under different FMCW signals. (a) Interference results of FMCW signals with different center frequencies; (b) interference results of FMCW signals with different frequency modulation slopes

3.5 密集脉冲信号干扰

通过在每 100 ns 内随机产生 n 个脉宽为 1 ns 的任意强度的干扰脉冲,探究干扰信号密集程度对抗干扰性能的影响。图 10 为不同密集程度的信号干扰下的仿真结果。[图 10(a)]为 10 段干扰信号,每段有 n 个不同强度脉冲在 100 ns 内的随机分布; [图 10(b)]为经过阈值检测后的结果; [图 10(c)]为 C_3 码字与阈值检测结果的滑动相关曲线,随着 n 的增加,相关峰变密集, $n=10$ 时,干扰信号对应滑动检测结果的最大峰值为 3,干扰信号会被误判为系统自身回波信号。

多次仿真改变 100 ns 内脉冲峰值的个数 ($0 \leq n \leq 15$),统计得到图 10 中 $R_{p=2}$ 和 $R_{p=3}$ 随 n 的变化曲线图 11, $R_{p=2}$ 和 $R_{p=3}$ 分别为滑动相关检测结果中幅

值为 2 和 3 的相关峰个数与 n 的比值。在图 11 中,随着 n 增大, $R_{p=2}$ 快速增大, $R_{p=3}$ 增长较为缓慢。当 $n=5$ 时,100 ns 内随机分布 5 个脉冲干扰,对应于 4 us 周期内随机分布 200 个干扰脉冲,相当于在应用场景中随机位置分布的 200 个传统单脉冲激光雷达作为干扰源同时对 CDMA 调制激光雷达进行干扰。检测结果中,幅值为 2 的概率为 10.13%,幅值为 3 的概率为 0.11%,则干扰带来的虚警率为 0.11%。结果表明,CDMA 调制激光雷达的抗干扰性能会随着干扰的密集程度增加而减弱,但是在实际道路场景中(传统激光雷达数量小于 200),该 CDMA 调制激光雷达方案可以满足抗干扰的要求。

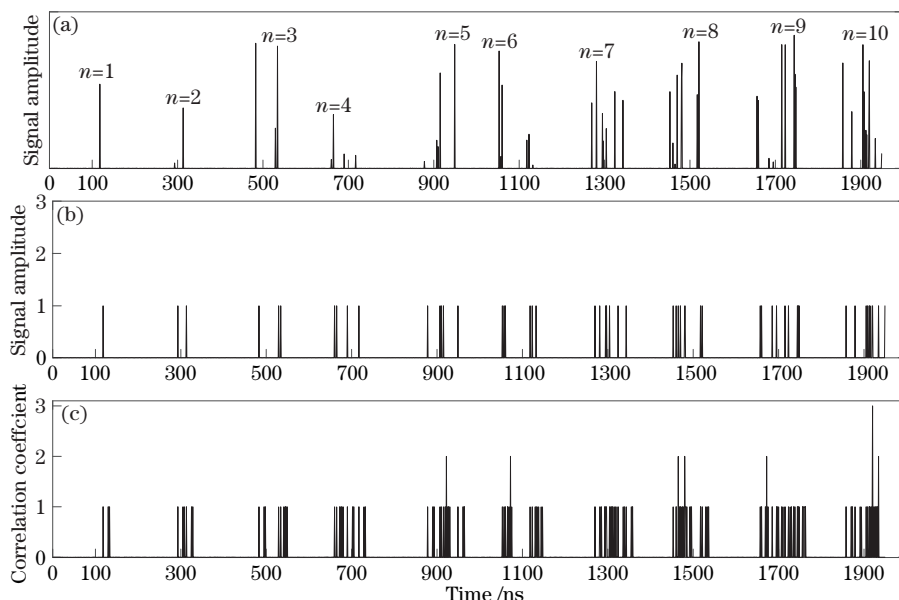


图 10 密集脉冲干扰仿真。(a)接收端信号;(b)阈值检测结果;(c) C_3 码字滑动相关检测结果
Fig. 10 Simulation of densely pulses interfering. (a) Received signal; (b) result of threshold detection;
(c) slide correlation result of C_3 code

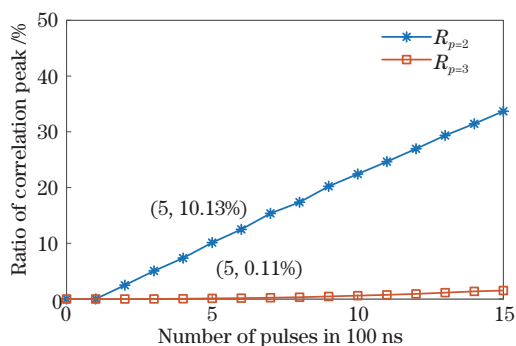


图 11 不同密度干扰下相关峰值比例变化
Fig. 11 Variation of correlation peak ratio under different density interference

4 结 论

文章着重研究了 CDMA 调制激光雷达在不同干扰源下的抗干扰性能。结果表明,在传统单脉冲激光雷达信号、同体制激光雷达信号和特定频率段或较小功率的 FMCW 激光雷达信号干扰下,干扰信号对应最大滑动相关峰值始终小于系统自身回波信号对应的最大相关峰值,因此可以实现对多种不同类型激光雷达的抗干扰。同时仿真结果表明,脉冲干扰的密集程度增加或 FMCW 干扰信号的强度增大都会减弱 CDMA 调制激光雷达的抗干扰性能。此外,在 200 个单脉冲激光雷达作为密集干扰源的场景中,干扰带来的错误率仅为 0.11%,可以满足实际应用中的抗干扰的要求。这些结果对发

展和改善车载激光雷达抗干扰技术具有重要的意义,同时也为大规模安全无人驾驶车载激光雷达应用提供一个可行性技术方案。对于 CDMA 调制激光雷达的下一步改进,可以通过增大正交码的码重来实现更大的滑动相关峰值并扩大码组容量,也可以根据固定间隔且对称的旁瓣特征,通过增加特征匹配来加强抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] Hecht J. Lidar for self-driving cars[J]. Optics and Photonics News, 2018, 29(1): 26-35.
- [2] 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.
- [3] Diehm A L, Hammer M, Hebel M, et al. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10796: 1079604.
- [4] Buttgen B, El Mechat M A, Lustenberger F, et al. Pseudonoise optical modulation for real-time 3-D imaging with minimum interference[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(10): 2109-2119.
- [5] Kim G, Eom J, Park Y. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10536: 1053620.

- [6] Carrara L, Fiergolski A. An optical interference suppression scheme for TCSPC flash LiDAR imagers [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2206.
- [7] Hwang I P, Lee C H. A rapid LiDAR without mutual interferences[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 18618484.
- [8] 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.
- [9] Takeuchi N, Sugimoto N, Baba H, et al. Random modulation cw lidar[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1382-1386.
- [10] Nagasawa C, Abo M, Yamamoto H, et al. Random modulation cw lidar using new random sequence[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(10): 1466-1470.
- [11] Ai X, Nock R, Rarity J G, et al. High-resolution random-modulation cw lidar[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4478-4488.
- [12] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [13] Zhao T, Wang B J, Wang Y C, et al. Free space ranging utilizing chaotic light[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 172728.
- [14] Cheng C H, Chen C Y, Chen J D, et al. 3D pulsed chaos lidar system[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12230-12241.
- [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] 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.
- [17] Ohtsuki T. Channel interference cancellation using electrooptic switch and optical hardlimiters for direct-detection optical CDMA systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(4): 520-526.
- [18] Abbas H S, Gregory M A, Austin M W. A new prime code for synchronous optical code division multiple-access networks[J]. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2018, 2018: 3192520.
- [19] Chung F R K, Salehi J A, Wei V K. Optical orthogonal codes: design, analysis and applications [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1989, 35(3): 595-604.
- [20] Safety of laser products-part 1: equipment classification and requirements (Edition 3.0): IEC 60825-1 INT 1-2017[S]. Geneva: International Standard-International Electrotechnical Commission, 2017.
- [21] 陈玉茹, 李晴, 王洪娟. 1.06 μm 激光大气衰减系数理论计算模型研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(2): 95-100.
- Chen Y R, Li Q, Wang H J. Theoretic calculation model of 1.06 μm laser atmosphere attenuation coefficient[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(2): 95-100.