光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.023

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

张天舒，王冰洁*，徐　航，刘　丽，李静霞

（太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室，太原 030024）

摘　要： 激光雷达已经成为无人智能车必备的环境感知设备。现有基于脉冲测距体制的车载激光雷达极易受到其他车载激光雷达的交叉干扰，导致雷达虚警和误判，引发交通事故。文章利用布尔混沌信号调制激光器产生的混沌激光作为雷达探测信号，结合扫描成像技术，构建混沌激光成像雷达系统，实验实现了目标物体的三维成像，并对其抑制交叉干扰的能力进行了实验测试。实验结果表明，在不采取任何抑制干扰措施的前提下，基于布尔混沌雷达波形的正交性，仍可在高强度干扰下实现探测目标的三维重构，有效抑制交叉干扰的影响。

关键词： 混沌激光雷达；布尔混沌；交叉干扰；三维成像

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0424－06

Mutual Interference Suppression of Chaotic Imaging Lidar for Automotive Application

ZHANG Tianshu, WANG Bingjie, XU Hang, LIU Li, LI Jingxia

(Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, CHN)

Abstract: Lidar has become a necessary environment sensing device for unmanned intelligent vehicles. The existing vehicular lidar based on pulse signal is vulnerable to the mutual interference of other vehicular lidars, which leads to false alarm and misjudgment, and even traffic accidents. In this paper, the Boolean chaotic laser is used as the lidar detection signal. Combined with the scanning imaging technology, the chaotic laser imaging lidar system is constructed. The three-dimensional imaging of the target object is realized, and the ability of suppressing mutual interference is tested experimentally. The experimental results show that the three-dimensional reconstruction of the detected target can be realized under high-intensity interference. Based on the orthogonality of the Boolean chaotic waveform, the mutual interference can be effectively suppressed.

Key words: chaotic lidar; Boolean chaos; mutual interference; 3D imaging

0　引言

激光雷达作为一种主动视觉传感器，具有对光照变化不敏感、测量范围大、距离分辨率高等优势，被认为是智能车环境感知传感器中最为重要的“眼睛”[1]。目前90％以上的无人智能车都安装了各种激光雷达，有的甚至可直接获取车体周围60％～75％的三维立体环境信息[2]，是其他传感器不可替代的。

如果未来大量无人智能车同时在复杂交通环境中行驶成为现实，车载雷达之间的交叉干扰将成为亟待解决的问题[3]。道路场景中存在多个车载雷达，任一车载雷达在其有效测距范围内不可避免地

收稿日期：2021－03－05.

基金项目：山西省自然科学基金项目(201801D121140)；山西省重点研发计划一般项目(201703D321036).

* **通信作者：**王冰洁

面临其他临近车载雷达发射信号的交叉干扰。如果干扰信号与本机雷达时频域波形相近，信号处理系统将其误认为是目标回波，将造成雷达虚警和误判，为智能车提供错误的决策依据，引发重大交通事故[4-5]。车载激光雷达之间的交叉干扰同样不可忽视。文献[6-7]实验证实车载脉冲激光成像雷达之间存在的交叉干扰导致成像结果信噪比降低，产生虚假回波和虚假目标。

如何抑制车载激光雷达之间的交叉干扰，研究者分别从硬件系统设计、信号处理算法等方面提出了不同解决方案[8-10]。其中，通过设计特殊雷达信号波形来实现交叉干扰抑制引起研究者的重点关注。现有车载激光雷达主要采用脉冲激光或者频率调制连续光作为探测信号，但波形时频域特征简单，容易复制，抗干扰能力差。文献[11-12]基于光码分多址技术调制激光脉冲，利用调制后脉冲序列具有的正交性抑制交叉干扰。文献[13-15]利用伪随机二进制序列调制连续激光作为雷达探测信号，在提高目标距离分辨率的同时抑制交叉干扰，其测量分辨率仍受电子器件和所用调制器的调制速度限制，并且需要价格昂贵的随机码发生器和高速外部调制器，增加了系统复杂度，成本高且维护、调试困难。

混沌激光作为非线性激光系统的输出，在频域表现为类噪声的宽带连续功率谱，在时域表现为对初始条件敏感、不可预测的非周期随机信号[16-17]。2004 年，文献[18]首次提出混沌激光雷达的概念，证实利用混沌激光频域上的宽带特性可实现目标距离的高分辨率测量，时域上的非周期随机性和不可预测性具有天然的抗干扰属性。文献[19]利用光反馈半导体激光器产生宽带混沌激光，对混沌激光测距雷达进行了多目标探测实验研究。文献[20]基于 MEMS 扫描镜实现了混沌激光三维目标成像。本文将布尔混沌信号发生器调制激光器产生的混沌激光作为雷达探测信号，结合扫描成像技术，构建混沌激光成像雷达系统，实验实现了目标物体的三维成像，并对其抑制交叉干扰能力进行了实验分析。

1　布尔混沌激光成像雷达系统

布尔混沌激光成像雷达系统装置如图 1 所示。混沌激光探测信号由布尔混沌信号发生器直接调制 520 nm 半导体激光器产生。经准直镜准直后的混沌激光探测信号被分束镜分为两路：一路作为参考信号，直接进入光电探测器 1；另一路作为探测信号经由二维扫描镜发射到目标，目标场景反射的回波信号进入接收光学系统聚集光束，使之进入光电探测器 2 的光敏面。光电探测器 1 和 2 将参考光信号和回波信号转化为电信号后，由实时示波器采集并输入计算机进行数据处理。实验装置中部分仪器参数如表 1 所示。

表 1　实验系统部分仪器参数

参数	值
激光器波长/nm	520
最大平均功率/mW	80
光电探测器 3 dB 带宽	5～1 000 MHz
示波器带宽/GHz	2
采样率/(GSa/s)	10
扫描系统最小扫描角度/(°)	0.03

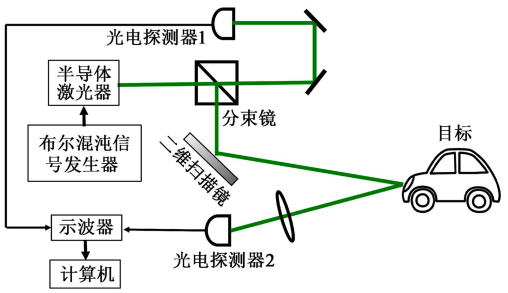


图 1　布尔混沌激光成像雷达实验装置图

1.1　三维成像测量原理

本文中三维成像利用单束激光旋转扫描实现。具体测量原理包括混沌相关测距和旋转扫描，由于混沌信号的相关曲线是理想的 δ 函数，可以用混沌相关测距来确定距离。混沌激光雷达相关测距原理可以描述为

$$R(\tau)=S_{\mathrm{ref}}\otimes S_0=\frac{1}{T}\int_0^T S_0(t-\tau)\cdot S_{\mathrm{ref}}(t)\mathrm{d}t\approx k\delta(\tau-\tau_0) \tag{1}$$

式中，k 是激光在空气中传播的损耗系数，S_0 代表探测信号，S_{ref} 作为参考信号，将两个信号进行上式中的互相关运算，可以得到 τ_0，其中 τ_0 是参考信号和空间目标之间的时间延迟。再根据 $d=ct/2$，计算出目标点的距离。其中，$c=3\times10^8$ m/s 为光速。

得到目标点距离信息后，利用上位机控制扫描镜对空间中的目标进行旋转扫描，探测不同位置处距离信息，采集不同时刻的位置信息和角度信息，最后利用坐标变换实现对空间目标的三维成像。

1.2　布尔混沌激光的产生与特性

布尔混沌信号发生器由现场可编程阵列(FPGA)编程实现。其原理如图 2 所示，7 个节点组成带有延时反馈的布尔网络，其中节点 2～7 是异或

门，节点 1 是异或非门，τ_{ij} $(1\leqslant i\leqslant n, 1\leqslant j\leqslant n)$ 表示 i 和 j 节点之间的传输延时。根据模拟电路的特性，节点时延取决于布尔逻辑门之间的供电电压，时延的大小可以通过改变逻辑门之间的电压进行调节。由于在逻辑运算电路中，存在非线性低通滤波效应，逻辑器件对信号无法进行快速响应。信号在级联之后会存在时延累积，使得逻辑运算之后信号逐渐混乱，形成混乱的时序。上述逻辑器件的非线性输出特性和布尔时延反馈特性的相互作用，可以产生稳定的宽带布尔混沌信号。

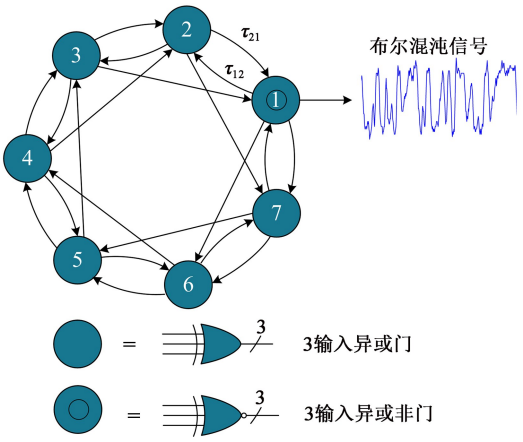
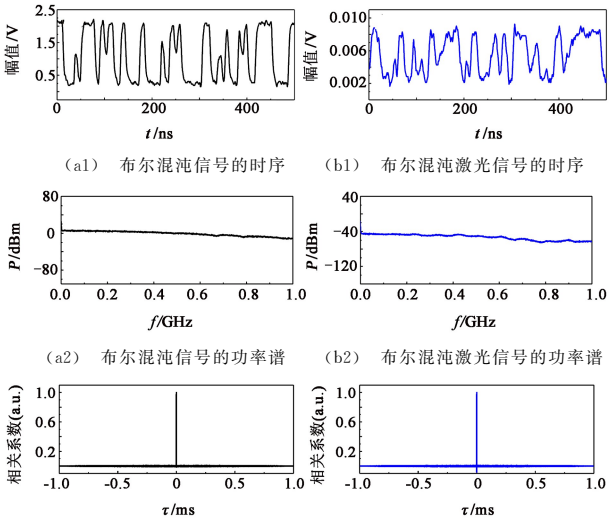


图 2 布尔混沌信号发生器原理图

布尔混沌发生器直接产生的布尔混沌信号以及经调制激光器后输出的布尔混沌激光信号分别如图 3(a1)～(a3)和图 3(b1)～(b3)所示。其中图 3(a1)，(b1)为布尔混沌信号的时序图，图 3(a2)，(b2)为功率谱，图 3(c1)，(c2)为自相关曲线。从图



(a1) 布尔混沌信号的时序 (b1) 布尔混沌激光信号的时序

(a2) 布尔混沌信号的功率谱 (b2) 布尔混沌激光信号的功率谱

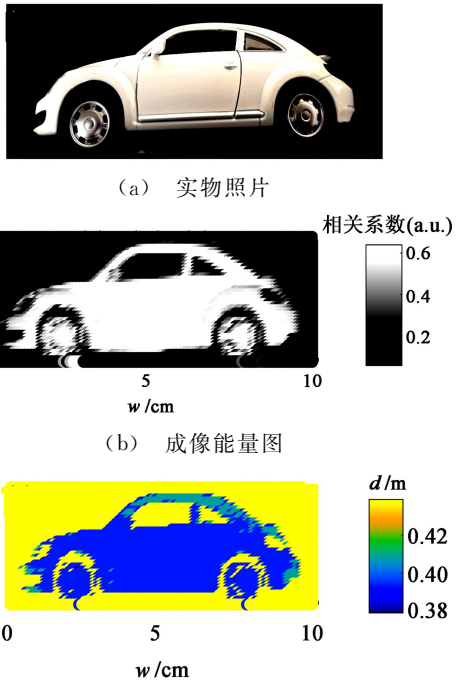
(a3) 布尔混沌信号的自相关曲线 (b3) 布尔混沌激光信号的自相关曲线

图 3 布尔混沌信号和布尔混沌激光信号的时序、功率谱和自相关曲线

3(a1)可以看出布尔混沌信号发生器产生的混沌信号脉冲幅值相近，相邻两个脉冲上升沿之间的时间间隔呈随机变化，峰峰值约为 2 V。调制激光器以后产生的布尔混沌激光信号峰峰值约为 10 mV，时序上仍然保持了布尔混沌的随机特性。自相关曲线和功率谱也保持了布尔混沌信号的良好自相关性和宽频带的特性。

1.3 目标场景扫描成像

利用 LabVIEW 开发上位机，对混沌激光雷达系统进行控制，实现空间目标的三维成像。实验中选择尺寸为 9.0 cm×3.5 cm 的汽车模型为探测目标，得到目标的三维相对距离坐标数据后，按照扫描时间顺序在直角坐标系中显示出来，重现目标形态各部分的相对距离形态。在此过程中，只是简单地将得到的原始数据在三维直角坐标系中显示，并没有对原始数据进行更进一步的去噪和二次处理。成像扫描点数为 1 000×400，即成像图像的分辨率为 1 000×400。图 4(a)是被测目标的实物图。图 4(b)和图 4(c)分别是激光雷达得到的三维重建图像。其中图 4(b)是根据相关曲线的反射强度得到的能量图，图中横纵坐标分别是物体的宽度和高度值，色度条颜色代表不同的相关系数，物体材质不同，反射系数也不同。在图 4(b)中能清晰看出车轮有很强的反射，而玻璃处相关系数几乎为 0，这是因



(a) 实物照片

(b) 成像能量图

(c) 三维成像距离图

图 4 汽车模型扫描成像结果

为玻璃是黑色的，吸收了激光雷达发出的信号。图 4(c)是激光雷达三维成像的距离图像，清晰地呈现了汽车模型的轮廓和车轮、车窗等细节。色度条中不同的颜色代表目标与雷达的相对距离，根据图像可以看出汽车模型的细节。

2　抑制交叉干扰实验分析测试

接下来对所构建的布尔混沌激光成像雷达系统的交叉干扰抑制能力进行实验测试和分析。依据交叉干扰的基本思路构建如图 5 所示的实验测试方案。主混沌激光雷达 A 正在对目标场景进行探测，另一个激光源 B 发射与真实雷达信号类型相同的布尔混沌信号进入主激光雷达的接收系统，模拟来源于其他同体制雷达的交叉干扰。

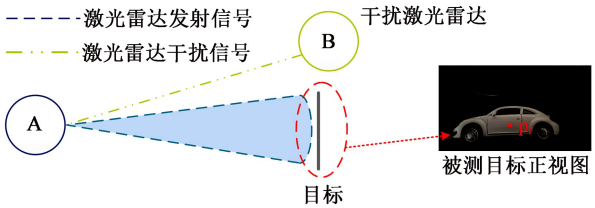


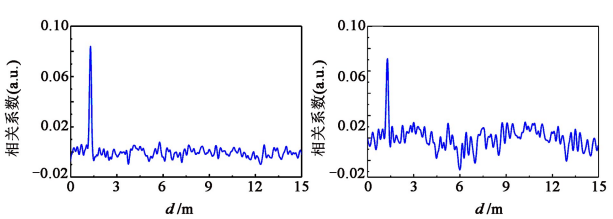
图 5　布尔混沌激光成像雷达抗干扰实验装置图

2.1　单点目标测试结果

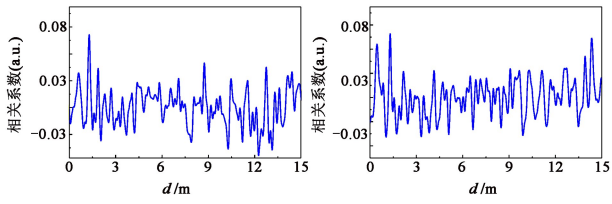
在距离主混沌激光雷达 1.5 m 位置处放置一个反射率为 0.9 的漫反射平板作为单点目标。实验中主要考虑干扰信号强度对 A 雷达系统目标探测结果的影响。这里定义干信比(Interference-Signal Ratio，ISR)来定量衡量干扰信号对主雷达回波信号的强度干扰：

$$ISR = 10 \times \lg \frac{P_i}{P_s} \tag{2}$$

其中，P_i 是主雷达系统接收到的干扰信号光功率，P_s 是主激光雷达系统接收的回波信号光功率。干扰信号强度增大对目标距离测试结果的影响如图 6 所示。从图中可以看出随着干扰信号强度的增加，1.5 m 位置处的目标峰值高度位置几乎没有任何变化，但是相关曲线基底噪声会逐渐变大。当 ISR 增



(a)　ISR=0 dB　　(b)　ISR=7.93 dB



(c)　ISR=12.92 dB　　(d)　ISR=15.83 dB

图 6　不同干扰强度下单点目标的测距结果

加到 15.83 dB 时，虽然旁瓣噪声显著增加，但是目标峰值仍然可清晰识别。在此基础上继续增大干扰信号强度，则目标峰值被淹没在旁瓣噪声中，无法定位目标位置。

利用相关曲线的峰值噪声比(Peak-to-Noise Ratio，PNR)来定量衡量干扰信号强度增大对测距结果的影响：

$$PNR = 10 \times \lg \left[\frac{P_{\text{peak}}}{\bar{n} + 3 \times \text{std}(n)} \right] \tag{3}$$

式中，P_{peak} 为相关曲线目标峰值大小，$\bar{n}$ 表示相关曲线噪声基底平均值，std(n)表示噪声基底的标准偏差。

实验中通过增加干扰信号功率增加 ISR，相应地，相关曲线的 PNR 随着 ISR 的增加逐渐减小，如图 7 所示。从拟合曲线可以得到，当 ISR=15.3 dB 时，PNR 下降到 3 dB。依据 3 dB 判据，认为当 ISR 高于 15.3 dB 时，将无法从背景噪声中识别目标。

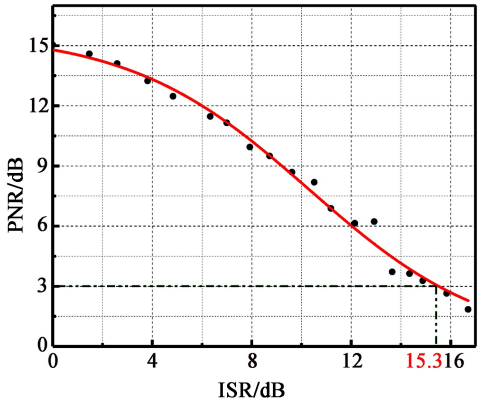
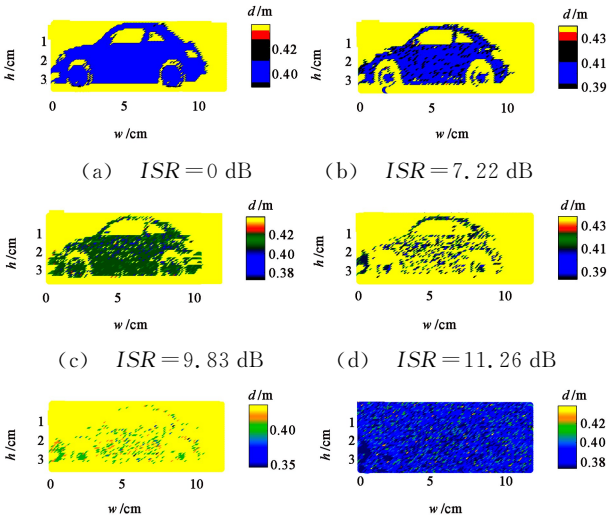


图 7　PNR 随 ISR 的变化关系

2.2　扫描成像测试结果

接下来实验测试增加干扰强度对扫描成像结果的影响。实验场景如图 5，测量对象仍为 9 cm×3.5 cm 的汽车模型，放置于 A 雷达系统前约 0.4 m 位置处。干扰激光源 B 发射同体制布尔混沌激光信号进入激光雷达 A 接收系统，持续不断形成连续干扰。汽车模型在 ISR 分别为 0，7.22，9.83，

11.22,12.08 和 15.21 dB 时的目标重构距离像如图 8(a)～(f)所示。可以看出,随着干扰信号强度的增大,成像质量恶化越来越明显,有效的回波点数减少,丢失的数据点越来越多。在 ISR 为 11.22 dB 时尚能维持基本形状,当 ISR 增加至 12.08 dB 时,汽车模型的轮廓已经非常模糊。当 ISR 增加至 15.21 dB 时,由于干扰信号的影响,已经完全无法实现目标的扫描成像。由此可以判断,对于反射率约为 0.6 的金属材质目标,该混沌激光雷达系统的同体制干扰信号容限约为 12 dB。



(a) $ISR=0$ dB (b) $ISR=7.22$ dB

(c) $ISR=9.83$ dB (d) $ISR=11.26$ dB

(e) $ISR=12.08$ dB (f) $ISR=15.21$ dB

图 8 不同 ISR 下的图像成像质量

引入图像错误概率 p_{img} 来定量衡量目标重构图像恶化的程度:

$$p_{\text{img}}=\frac{N_{\text{error}}}{N_{\text{total}}} \tag{4}$$

其中,p_{img} 是出现错误点的概率,选取图 8 中无干扰时的点云数据为标准点云。N_{error} 是不同 ISR 下测量的点云数据与标准点云数据对比出现错误点的个数,N_{total} 是点云数据点的总数。图 9 是在不同 ISR 下成像错误概率图,可以看出,随着干扰功率的逐渐增加,三维成像图中出现错误点的概率也逐渐增加。

实验中进一步测试了常规脉冲激光信号抑制交叉干扰的能力。将图 5 所示的主激光雷达 A 探测信号更换为重复频率为 20 MHz、占空比为 10% 的常规脉冲信号,同时干扰激光源 B 发射的干扰信号是与主激光雷达 A 类型相同的脉冲信号,但是波形滞后 25 ns 进入主激光雷达的接收系统。通过上述步骤模拟脉冲激光雷达之间的交叉干扰。需要说明的是,实验中为了在同等条件下比较脉冲信号和布尔混沌信号抑制交叉干扰的能力,实验测试中没有从实验装置硬件设计、回波信号预处理等方面添加任何抑制干扰的措施。

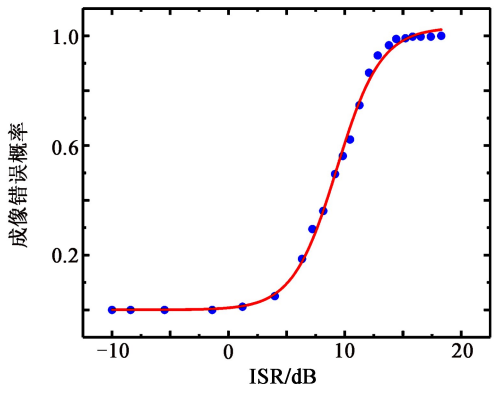
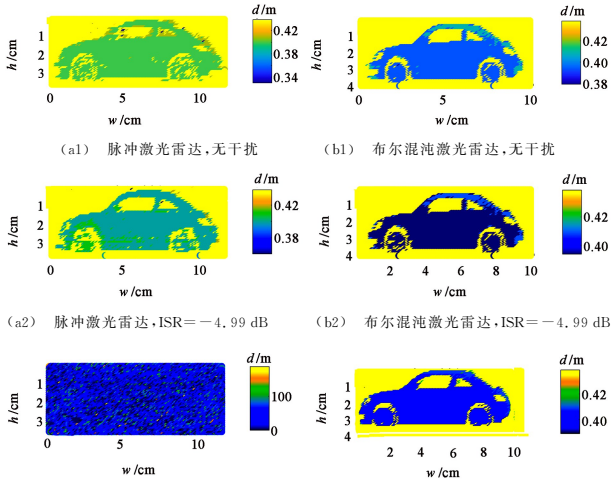


图 9 不同 ISR 下三维成像错误概率

在没有任何干扰时对汽车模型的距离像重构结果如图 10(a1)所示。目标轮廓清晰,成像效果良好。基于此增加脉冲干扰强度,当 ISR 为 −4.99 dB 时,成像结果如图 10(a2)所示,虽然有一定程度的干扰,但是成像依然清晰。当 ISR 增加至 0 dB 时,由于没有采取干扰抑制措施,干扰脉冲波形滞后 25 ns,主脉冲激光雷达无法分辨出是自身回波信号还是干扰信号串扰,出现很多虚假目标,以至于不能正常地分辨出真实被扫描的物体,成像结果如图 10(a3)所示。将激光雷达 A 和干扰激光源 B 的发射信号全部更换为布尔混沌信号,保持其他实验条件不变重复实验。布尔混沌激光雷达在上文同等干扰程度下的目标重建结果如图 10(b1)～(b3)所示,ISR 为 0 dB 时目标成像结果和没有干扰时的成像结果并无明显区别,干扰容限远大于常规脉冲波形。



(a1) 脉冲激光雷达,无干扰 (b1) 布尔混沌激光雷达,无干扰

(a2) 脉冲激光雷达,ISR=−4.99 dB (b2) 布尔混沌激光雷达,ISR=−4.99 dB

(a3) 脉冲激光雷达,ISR=0 dB (b3) 布尔混沌激光雷达,ISR=0 dB

图 10 同等体质激光雷达抗干扰性能研究

布尔混沌波形独特的正交性，保证了其作为雷达探测信号时具有极强的交叉干扰抑制能力。根据混沌信号的初值敏感性，可以产生大量正交性良好的雷达波形，满足复杂交通环境下，大量车载雷达同时探测的应用场景，不需要复杂的雷达系统硬件设计结构和复杂干扰噪声抑制算法，即可达到轻松抑制干扰的效果。

3　结论

综上所述，本文将布尔混沌信号发生器调制激光器产生的混沌激光作为雷达探测信号，结合扫描成像技术，构建混沌激光成像雷达系统，实验实现了目标物体的三维成像，并对其抑制交叉干扰能力进行了实验分析。成像实验结果表明，基于布尔混沌信号的正交性，混沌激光雷达对于交叉干扰具有较大的容忍限度，能够有效抑制干扰信号，在高强度干扰下仍然能够清晰成像，特别适用于多个雷达系统同时工作的应用场景，如车载雷达应用等。

参考文献：

[1] Schwarz B. LIDAR: Mapping the world in 3D[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 429-430.

[2] Thrun S. Toward robotic cars[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 99-106.

[3] Royo S, Ballesta G M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles[J]. Appl. Sciences, 2019, 9(19): 4093.

[4] Goppelt M, Blocher H L, Menzel W. Analytical investigation of mutual interference between automotive FMCW radar sensors[C]// Proc. of 2011 German Microwave Conf., 2011: 1-4.

[5] Bourdoux A, Parashar K, Bauduin M. Phenomenology of mutual interference of FMCW and PMCW automotive radars [C]// Proc. of 2017 IEEE Radar Conf., 2017: 1709-1714.

[6] Kim G, Eom J, Park Y. An experiment of mutual interference between automotive lidar scanners[C]// Proc. of 12th Inter. Conf. on Information Technology: New Generations, 2015: 680-685.

[7] Kim G, Eom J, Park Y. Mutual interference on mobile pulsed scanning lidar[J]. IEMEK J. of Embedded Systems and Applications, 2017, 12(1): 43-62.

[8] Hall D S. High definition lidar system: United States Patent, US8767190B2[P]. 2014-07-01.

[9] 李新斌，刘继勇，刘　星. 基于小波分析的脉冲激光回波抗干扰算法研究[J]. 机械与电子，2018，36(1)：31-34，40.
Li Xinbin, Liu Jiyong, Liu Xing. Research on anti-interference algorithm for pulse laser echo based on wavelet analysis[J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(1): 31-34, 40.

[10] Zhang W, Li Y, Huang Z, et al. Fog backscattering interference suppression algorithm for FMCW laser fuze based on normalized frequency spectrum threshold[J]. Optik, 2017, 131: 188-193.

[11] Fersch T, Weigel R, Koelpin A. A CDMA modulation technique for automotive time-of-flight LiDAR systems[J]. J. of Transportation, 2017, 17(1): 3507-3516.

[12] Gunzung K, Park Y. LIDAR pulse coding for high resolution range imaging at improved refresh rate[J]. Opt. Express, 2016, 24(21): 23810-23828.

[13] Buttgen B, El Mechat M A, Lustenberger F, et al. Pseudonoise optical modulation for real-time 3-D imaging with minimum interference[J]. IEEE Trans. on Circuits & Systems Ⅰ Regular Papers, 2007, 54(10): 2109-2119.

[14] Ai X, Nock R, Rarity J G, et al. High-resolution random-modulation CW lidar[J]. Appl. Optics, 2011, 50(22): 4478-4488.

[15] Yang Z, Li C, Yu M, et al. Compact 405 nm random-modulation continuous wave lidar for standoff biological warfare detection[J]. J. of Appl. Remote Sensing, 2015, 9(1): 096042.

[16] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 151-162.

[17] Wang A, Yang Y, Wang B, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference[J]. Opt. Express, 2013, 21(7): 8701-8710.

[18] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2004, 10(5): 991-997.

[19] Wang B, Wang Y, Kong L, et al. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar[J]. Chinese Opt. Lett., 2008, 6(11): 868-870.

[20] Cheng C H, Chen C Y, Chen J D, et al. 3D pulsed chaos lidar system[J]. Opt. Express, 2018, 26(9): 12230-12241.

作者简介：

张天舒(1995—)，男，河南驻马店人，硕士研究生，主要从事成像激光雷达相关研究；

王冰洁(1978—)，女，山西大同人，博士，教授，主要从事混沌信号产生及其应用研究。