

引文格式

胡志宏, 朱精果, 姜成昊. 数字混沌激光雷达 [J].集成技术, 2024,(?):??

Citing format

Hu ZH, Zhu JG, Jiang CH, et al. Digital Chaos LiDAR[J]. Journal of Integration Technology,2024,(?):??

数字混沌激光雷达

胡志宏^{1,2}, 朱精果¹, 姜成昊¹

¹ (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

² (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 混沌激光雷达具有高分辨率、抗干扰和隐蔽性强的优点, 然而受限于混沌光源的功率与线性探测器的灵敏度以及硬件带宽, 混沌激光雷达在远距离目标探测上存在显著不足。为解决这一问题, 本文提出了数字混沌激光雷达 (Digital chaos LiDAR) 的概念并进行了理论分析与仿真验证。通过蒙特卡洛 (Monte Carlo) 仿真, 我们研究了连续混沌激光雷达 (CW chaos LiDAR)、脉冲混沌激光雷达 (Pulsed chaos LiDAR) 与数字混沌激光雷达的探测概率、虚警概率与探测距离。仿真结果表明数字混沌激光雷达在探测概率大于 95%, 虚警概率小于 5% 的置信区间内, 探测距离对比连续混沌激光雷达与脉冲混沌激光雷达分别提高了约 35 倍与 8 倍。得益于单光子探测器的超高灵敏度与数字化输出, 数字混沌激光雷达未来有望在远距离目标探测成像方面获得广泛应用。

关键词 混沌激光; 数字混沌激光雷达; 蒙特卡洛; 单光子探测器

中图分类号: 280.3400; 280.3640; 280.5600 **doi:** 10.12146/j.issn.2095-3135.20230724001

Digital Chaos LiDAR

HU Zhihong^{1,2}, ZHU Jingguo², JIANG Chenghao²

¹ (Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

² (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chaos LiDAR has attracted significant attention due to its high resolution, inherent anti-interference capability, and stealth characteristics. However, the performance of chaos LiDAR in long-range target detection and imaging is quite limited by the power of chaotic light sources, sensitivity of linear detectors, and hardware bandwidth. To overcome the bottleneck of chaos LiDAR, this paper proposes the concept of Digital chaos LiDAR

来稿日期: 2023-07-22 修回日期: 2023/10/16

作者简介: 胡志宏, 博士, 研究方向单光子激光雷达; 朱精果 (通讯作者), 研究员, 研究方向光子集成与激光雷达; 姜成昊, 副研究员, 研究方向激光雷达, E-mail: zhujingguo@ime.ac.cn.

and conducts theoretical analysis and simulation verification. Through Monte Carlo simulation, we studied the detection probability, false probability, and detection range of Continuous-wave chaos LiDAR, Pulsed chaos LiDAR, and Digital chaos LiDAR. The simulation results show that, within the confidence interval where the detection probability is greater than 95% and the false alarm probability is less than 5%, the detection range of digital chaos LiDAR is approximately 35 times and 8 times higher than that of continuous-wave chaos LiDAR and pulsed chaos LiDAR, respectively. With the advantages of ultra-high sensitivity of single-photon detectors and digital output, digital chaos LiDAR is expected to be widely used in the field of long-range target detection and imaging.

Key words: chaos laser; Digital chaos LiDAR; Monte Carlo; single photon detector

1 引言

近年来,混沌激光在保密通信[1]、物理随机数产生[2]、光纤传感[3]及激光雷达[4, 5]等方面都受到广泛关注。混沌光源是一种宽频谱、类噪声的物理随机光源,因此基于混沌光源的激光雷达系统具有高分辨以及天然的抗干扰能力与隐蔽特性[6]。2004年, Lin 等人首次提出了连续混沌激光雷达的概念并进行了测距验证[7]。2008年,王云才等人实验证明了连续混沌激光雷达对多目标的实时探测能力[8]。2018年, Lin 等人在前期基础上提出了一种 3D 脉冲混沌激光雷达,实现了 100m 目标、4mm 精度的三维成像[9]。2023年,王兴军等人提出了基于光频率梳的并行混沌激光雷达,首次实现了混沌激光雷达的片上化,并证明了其具有较强的抗干扰能力[10]。然而,受限于混沌激光光源的功率与线性探测器的灵敏度以及硬件带宽,混沌激光雷达在远距离目标探测与成像方向受到了极大限制。要想实现更远目标的探测与成像,必须加入光放大器进行功率放大,这不仅增大了背景噪声而且增加了系统复杂度与成本。

上个世纪 90 年代以来,单光子探测技术的蓬勃发展极大推动了激光雷达在远距离目标成像[11]、水下目标成像[12]、伪装目标成像[13]等微弱信号探测方面的应用。得益于单光子探测器的超高灵敏度、数字化输出以及大规模阵列化的优势,单光子激光雷达已成为科研与行业的研究热点[14-17]。然而,随着消费级激光雷达的大量涌入以及复杂的应用场景,激光雷达面临日益严峻的抗干扰挑战[18, 19]。在单光子激光雷达抗干扰能力研究方向,众多创新技术被提出,包括时间相关单光子计数技术[20]、伪随机编码技术[14, 21]、混沌脉冲位置调制技术[18, 22]等。近年来,基于物理随机编码的单光子探测技术脱颖而出。相较于伪随机编码技术,物理随机编码技术理论上具有更强的抗干扰能力。2020年 Liu 等人提出利用单光子探测器响应背景噪声产生适应于死区时间的物理随机序列,并搭建了物理随机编码单光子雷达,极大降低了“1”码元的漏测概率[23]。同年, Tsai 等人提出利用单光子探测器响应 LED 光产生适应于死区时间的物理随机序列,实现了基于随机脉冲位置调制的单光子探测技术,并证明了其具有更强的抗干扰能力[24]。

受上述工作启发,我们首次将结合混沌激光雷达技术与单光子探测技术,利用单光子探测器响应混沌光子信号产生适应于死区时间的物理随机序列,提出了一种全新的激光雷达概念:数字混沌激光雷达。相较于传统线性雪崩探测器,单光子探测器具有光子量级灵敏度。因此,在更低的发射功率条件下,数字混沌激光雷达能实现更远距离的目标探测,克服了混沌光源能量受限的问题;同时混沌光源作为一种物理随机光源,混沌单光子激光雷达具有天然的抗干扰能力,能够满足复杂环境的应用需求。对比连续混沌激光雷达及脉冲混沌激光雷达,数字混沌激光雷达利用单光子探测器代替了传统线性探测器,不再需要 ADC 采样与量化,其信号采集与处理是全数字化的[25]。因此,不再受限于 ADC 与线性探测器等硬件带

宽限制。数字混沌激光雷达利用一路单光子探测器响应微弱的参考混沌激光产生参考物理随机序列，同时通过参考物理随机序列对探测混沌激光进行调制，另一路单光子探测器探测目标漫反射光产生回波物理随机序列，最终通过全数字化的参考随机序列与回波随机序列之间的互相关运算实现目标位置信息获取。本文我们对数字混沌激光雷达进行了理论与仿真分析，包括测距原理与可行性分析、探测概率、虚警概率以及探测距离。与连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达对比，数字混沌激光雷达在 10mW 的平均发射功率条件下探测距离分别提高了约 35 倍与 8 倍。

2 数字混沌激光雷达系统与测量原理

2.1 数字混沌激光雷达系统

数字混沌激光雷达系统结构如图 1 所示。混沌激光通过准直透镜后被分束器 BS (Beam splitter) 一分为二：一路作为参考光，一路作为探测光。单光子探测器 SPAD 1 (Single photon avalanche detector) 响应衰减后的参考信号产生参考随机序列，记为 $a(n)$ 。探测光经参考序列调制后由光学发射系统 OTS (Optics transmitting system) 发射，照射到目标物后发生漫反射，经光学接收系统 ORS (Optics receiving system) 后聚焦到单光子探测器 SPAD 2 中产生回波随机序列，记为 $b(n)$ 。参考序列 $a(n)$ 与回波序列 $b(n)$ 同时被信号处理单元 SPU (Signal processing unit) 接收并处理。最终，通过参考序列 $a(n)$ 与回波序列 $b(n)$ 的互相关运算实现目标物体位置信息的提取。

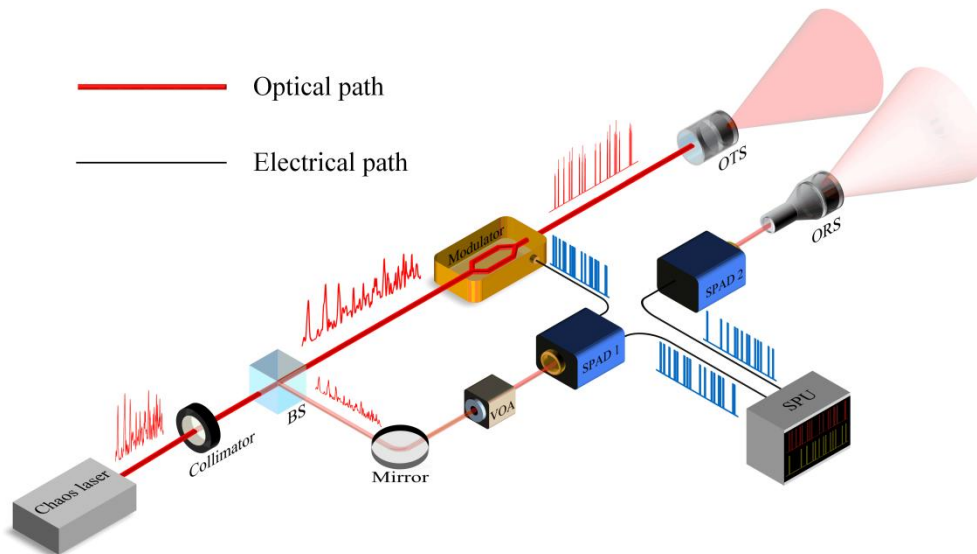


图 1 数字混沌激光雷达结构. BS: 分束器; VOA: 可调光学衰减器; OTS: 光学发射系统; ORS: 光学接收系统; SPAD: 单光子雪崩探测器; SPU: 信号处理单元

Fig. 1 Structure of Digital Chaos LiDAR. BS: Beam splitter; VOA: variable optical attenuator; OTS: Optical transmitting system; ORS: Optical receiving system; SPAD: Single photon avalanche detector; SPU: Signal processing unit

2.2 测量原理

混沌激光是一种类噪声的信号，其发射功率记为 $P(t)$ ，衰减后的参考光功率为 $\delta P(t)$ ， δ 为衰减系数。那么 SPAD 1 转化的平均初始光电子辐照度可以表示为：

$$\psi_{PE1}(t) = \eta_{qe} \left(\frac{\delta P(t)}{h\nu} + \psi_{Solar} \right) + \psi_{dc} \quad (1)$$

其中, η_{qe} 表示 SPAD 的量子效率, ψ_{Solar} 表示背景光的光子辐照度, ψ_{dc} 表示暗计数率。则任意时间门 (时间数字转换器 TDC 的时间分辨率) 内的平均初始光电子数可以表示为:

$$m_{PE1}(t, \Delta t_1) = \int_t^{t+\Delta t_1} \psi_{PE1}(t) dt \quad (2)$$

本文中, 我们认为当参考信号与回波信号光子数较少时, 混沌信号的统计模型服从 Poisson 随机分布[26]。因此, 当平均初始光电子数为 m_{PE1} 时, 至少发生 1 次雪崩事件的概率可以表示为:

$$P_{d1}(k \geq 1) = 1 - \exp(-m_{PE1}) \quad (3)$$

因为混沌激光的振幅是随机变化的, 因此, SPAD 1 响应参考光生成的参考序列也随机的, 记作 $a(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$, N 是随机序列的码元个数, 理论上 N 可以无限大。 $a(n)$ 序列的码元宽度记为 ΔT 。

在探测路中, 探测光的功率被认为基本等于发射光功率 $P(t)$ 。经参考序列调制后的探测信号由物理随机脉冲序列组成, 可以表示为:

$$a(t) = P(t - n\Delta T) \cdot a(n) \quad (4)$$

回波信号的功率通过激光雷达方程可以得到:

$$S_{return}(t) = a(t - \tau_{target}) \cdot \left(\frac{FOV}{\theta_T} \right)^2 \frac{\rho}{\pi} \frac{A_R}{R^2} \eta_R \eta_T T^2 \cos \theta_{target} \quad (5)$$

其中, $\tau_{target} = \frac{2R}{c}$, R 是探测距离, c 是光速; τ_{target} 是探测信号的往返时间。 FOV 是接收

视场角, θ 是发射光束发散角, ρ 是目标反射率, A_R 是接收孔径面积, η_R 与 η_T 分别是接收与发射系统的透射率, T 是大气透射率, θ_{target} 是激光光束与目标物表面法线的夹角。

SPAD 2 接收到回波信号后转化的平均初始光电子辐照度可以表示为:

$$\psi_{PE2}(t) = \eta_{qe} \left(\frac{S_{return}(t)}{h\nu} + \psi_{Solar} \right) + \psi_{dc} \quad (6)$$

则任意时间门 Δt_2 内的平均初始光电子数可以表示为:

$$m_{PE2}(t, \Delta t_2) = \int_t^{t+\Delta t_2} \psi_{PE2}(t) dt \quad (7)$$

当平均初始光电子数为 m_{PE2} 时, 至少发生 1 次雪崩事件的概率可以表示为:

$$P_{d2}(k \geq 1) = 1 - \exp(-m_{PE2}) \quad (8)$$

同样，SPAD 2 响应回波信号生成的回波序列也是随机的。理论上，回波序列与参考序列只存在时间 τ_{target} 的延迟。参考序列 $b(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$ 。本文中，假设 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ ，那么：

$$b(n) = a\left(n - \left\lfloor \frac{\tau_{target}}{\Delta t} \right\rfloor\right) \quad (9)$$

通过参考序列与回波序列的互相关运算实现目标位置信息的提取，即：

$$g(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n)b(n) \quad (10)$$

当 $\tau = \tau_{target}$ 时，互相关函数 $g(\tau)$ 的值最大。目标距离为 $R = \tau_{target} \cdot c / 2$ 。

3 理论模型与分析

3.1 物理随机序列的产生及特性

从上述原理分析中可知，参考序列的自相关特性决定了数字混沌激光雷达测量原理的可行性。图 2 展示了混沌激光通过 SPAD 1 产生物理随机数的过程。因为混沌激光的振幅是随机变化的，因此，在振幅较大的时间门内产生 ‘1’ 码元的概率较大，在振幅较小的时间门内产生 ‘0’ 码元的概率较大。

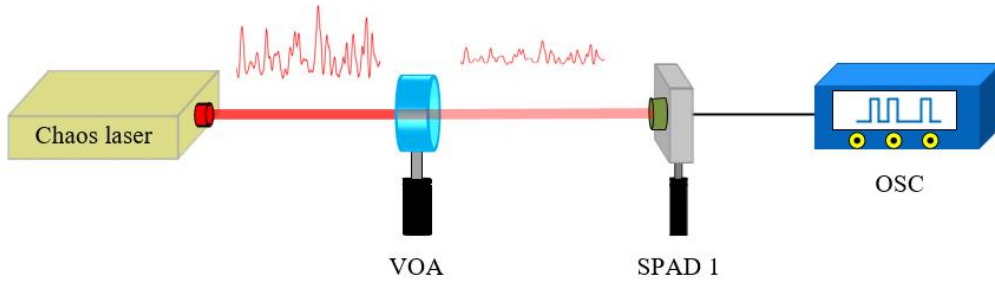


图 2 物理随机序列产生示意图

Fig. 2 Schematic of physical random sequences generation

考虑到 SPAD 1 死区时间 τ_{d1} 的影响，发生雪崩事件的探测概率理论模型由公式 (3) 修改为：

$$P_{D1} = \exp\left(-\int_{t-\tau_{d1}}^t \eta_{qe} \psi_{Solar} + \psi_{dc} dt\right) \cdot P_{d1} \quad (11)$$

为了对数字混沌激光雷达测量原理的可行性进行验证，我们对 SPAD 响应混沌激光的结果进行蒙特卡洛仿真。在仿真中，混沌光源的仿真参数参考文献[27]，其他参数如表 1 所示：

表 1 用于产生物理随机序列的仿真参数

Table 1 Simulation parameters for generating physical random sequence

Parameter (SPAD 1)	Value
Wavelength	1550nm
Dead time τ_{d1}	20ns
Photon detection efficiency η_{ge}	20%
Time bin Δt_1	200ps
Dark counts ψ_{dc}	20kHz
Background noise	50MHz
Code width ΔT	1ns
Sequence length	12us
Mean photon number	From 0.01/ns to 10/ns

如图 3(a)所示, 对蒙特卡洛仿真产生的随机序列作自相关运算, 可以明显看出 SPAD 1 响应混沌激光产生的随机序列具有良好的相关特性, 这说明用混沌激光产生的物理随机序列作为探测信号是可行的。同时, 从图 3(b)中也可以发现, 随机序列的相关特性与入射至 SPAD 1 中的混沌激光的平均光子数是息息相关的。随着混沌激光的平均光子数从 0.01/ns 增加至 10/ns, 自相关曲线的最大旁瓣先减小后增大, 这意味着随机序列的相关特性先变优随后恶化。这是因为当平均光子数较少时, 随机序列中 ‘1’ 码元的个数较少, 自相关特性较差; 随着平均光子数的增加, ‘1’ 码元的个数也逐渐增加, 自相关特性逐渐变好, 但是随着平均光子数继续增加, ‘1’ 码元个数的增加导致随机序列的随机性降低, 直至出现序列出现周期性, SPAD 1 此时也进入饱和状态。在后续的仿真中, 入射至 SPAD 1 中的平均光子数设定为 0.1/ns, 以确保数字混沌激光雷达系统具有良好的测量特性, 此时, ‘1’ 码元产生速率为 12.5 MHz, 高于背景噪声产生的 ‘1’ 码元速率 (10 MHz)。

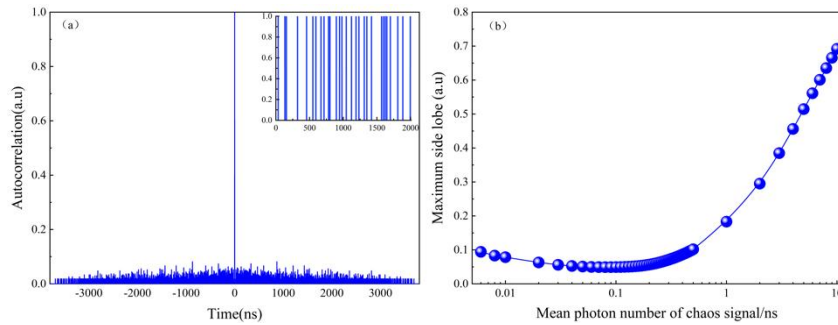


图 3 随机序列的自相关特性。(a) 自相关曲线; (b) 自相关曲线的最大旁瓣

Fig. 3 Auto-correlation properties of physical random sequence. (a) Auto-correlation cure; (b)Maximum side lobe of auto-correlation curve

3.2 数字混沌激光雷达系统仿真

在本节中, 利用 Monte Carlo 仿真对数字混沌激光雷达系统的测距过程展开了数值模拟, 其仿真过程如图 4 所示。为了更接近真实情况, 每个参数变量进行了 10000 次 Monte Carlo 仿真, 即 $k=10000$ 。

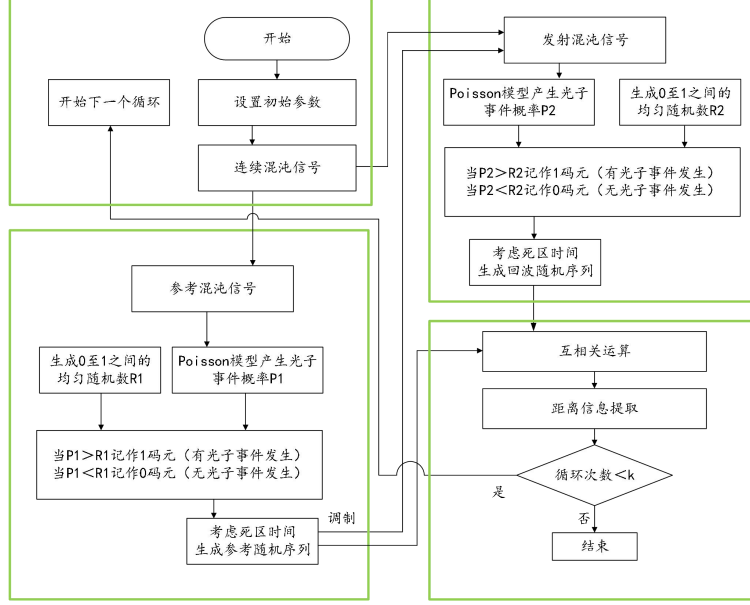


图 4 Monte Carlo 仿真流程

Fig. 4 Monte Carlo simulation process

其中混沌光源、SPAD 1 的仿真参数同 3.1 节，SPAD 2 的仿真参数基本与 SPAD 1 保持相同，序列长度设置为 20 us，其他系统仿真参数如表 2 所示：

表 2 CSP Lidar 系统仿真参数[22]

Table 2 Simulation parameters of CSP Lidar system [22]

Parameter (SPAD 2)	Specifications
Average power of chaos laser P	10mW
Divergence angle of expanded laser beam θ_T	1mrad
Single path transmission efficiency T	1
Reflectivity of target ρ	0.1
Transmitter optics efficiency η_T	0.4
Receiver optics efficiency η_R	0.7
Receiver aperture area A_R	$12.56 \times 10^{-4} m^2$
Target range R	100m

考虑到 SPAD 2 死区时间 τ_{d2} 的影响，发生雪崩事件的探测概率理论模型由公式 (8)

修改为：

$$P_{D2} = \exp\left(-\int_{t-\tau_{d2}}^t \eta_{qe} \psi_{Solar} + \psi_{dc} dt\right) \cdot P_{d2} \quad (12)$$

通过蒙特卡洛仿真，我们对 100 m 的目标进行了测距分析，结果如图 5 所示。图 5(a)-5(d) 分别是参考混沌信号、SPAD 1 生成的参考随机序列、经参考序列调制的发射信号以及 SPAD 2 生成的回波随机序列。从图 5(e)中可以看出参考序列与回波序列的互相关曲线在 100m 处具有明显的峰值，这表明数字混沌激光雷达可以实现对 100 m 处的目标位置信号提取。

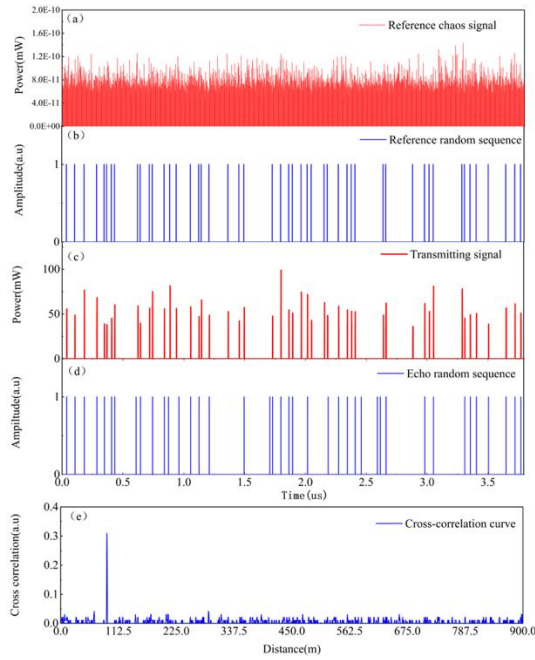


图5 数字混沌激光雷达测距。(a) 参考混沌信号；(b) 参考随机序列；(c) 发射信号；(d) 回波随机序列；(e) 互相关曲线

Fig. 5 Digital Chaos LiDAR ranging. (a) Reference chaos signal; (b) Reference random sequence; (c) Transmitting signal; (d) Echo random sequence; (e) Cross correlation curve

4 结果

4.1 探测概率与虚警概率

探测概率与虚警概率是评价单光子激光雷达系统的两个重要指标。在本节，通过蒙特卡洛仿真，研究了连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达与数字混沌激光雷达系统的探测概率与虚警概率随信噪比变化曲线。首先定义激光雷达系统的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)，如公式(13)所示。

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{g(\tau)}{3\sigma_{noise}} \right) \quad (13)$$

其中 σ_{noise} 是互相关曲线背景噪声的标准偏差。为了更加真实准确的模拟激光雷达系统探测概率与虚警概率，我们对每个仿真参数进行了 10000 次蒙特卡洛仿真，仿真参数同 3.2 节。最终探测概率与虚警概率的统计结果如图 6 所示。连续混沌激光雷达与脉冲混沌激光雷达本质上还是模拟信号转化为数字信号的处理过程。因此，从图 6(a)与图 6(b)可以看出，当两类混沌激光系统的探测概率达到 95% 时，其 SNR 均为 5.2 dB。而数字混沌激光雷达系统的探测概率为 95% 时，其 SNR 阈值为 7.8 dB，如图 6(c)。这意味着满足探测概率大于 95% 与虚警概率小于 5% 的置信区间，数字混沌激光雷达需要较高的信噪比。其原因在于单光子探测器获取的数据仅仅保留了部分信号。

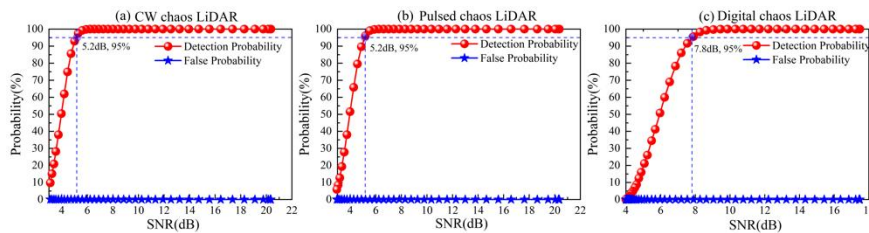


图6 探测概率（红色）与虚警概率（蓝色）。(a) 连续混沌激光雷达；(b) 脉冲混沌激光雷达；(c) 数字混

Fig. 6 Detection probability (red) and false probability (blue) of (a) CW chaos lidar, (b) pulsed chaos lidar and (c) Digital Chaos lidar

4.2 探测距离

通过蒙特卡洛仿真，对比了连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达以及数字混沌激光雷达的探测距离。参考车载激光雷达的测试标准，将目标反射率设置为 0.1 与 0.9，其他参数条件保持一致。如图 7 所示，无论反射率为 0.1 或是 0.9，数字混沌激光雷达的探测范围相较于连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达分别提高了约 35 倍与 8 倍。在 10 mW 的平均发射功率下，数字混沌激光雷达的最远探测距离可达 915m@0.9。

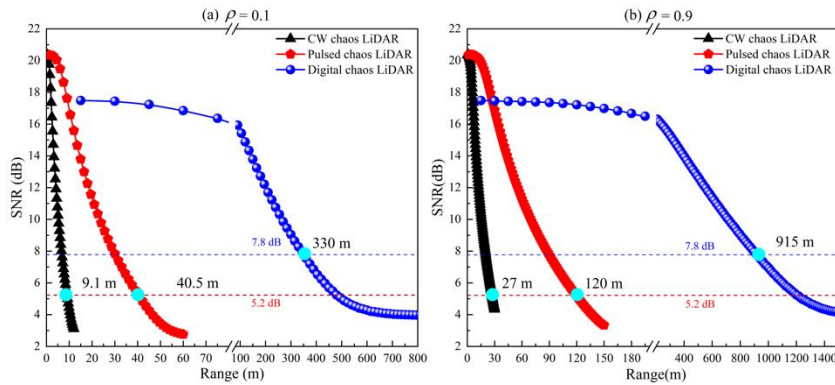


图 7 探测距离对比

Fig. 7 Comparison of detection range

5 结论

本文首次提出了数字混沌激光雷达的概念，并通过理论分析与蒙特卡洛仿真证明了数字混沌激光雷达的可行性，并仿真对比了连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达与数字混沌激光雷达系统的探测概率与虚警概率。数字混沌激光雷达在探测概率大于 95%、虚警概率小于 5%的置信区间内探测距离相较于连续混沌激光雷达与脉冲累积激光雷达分别提高了约 35 倍 8 倍。相较于文献[9]中的脉冲混沌激光雷达，数字混沌激光雷达将探测距离从百米量级提升至公里量级。此外，相较于传统基于线性探测器的混沌激光雷达（连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达），数字混沌激光雷达突破了硬件带宽与采样率的限制，实现了全数字化的处理，易于片上混沌集成。相较于物理随机编码的单光子探测系统而言，本系统可以产生等效频率更高且适应 SPAD 死区时间的物理随机序列，调控更加简易与便捷。得益于单光子探测器的超高灵敏度与数字化输出，数字混沌激光雷达具有结构简单、高动态范围的特点，在远距离探测与成像方面应用潜力巨大。

参考文献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. Nature, 2005, 438(7066): 343-346.
- [2] Shen B, Shu H, Xie W, et al. Harnessing microcomb-based parallel chaos for random number generation and optical decision making [J]. Nature Communications, 2023, 14(32): 1-10.
- [3] Wang C, Li J, Zhou X, et al. Chaos Raman distributed optical fiber sensing [J]. Light: Science &

-
- Applications, 2023, 12(3): 1-17.
- [4] Lukashchuk A, Riemensberger J, Tusnin A, et al. Chaotic microcomb-based parallel ranging [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(7): 814-821.
- [5] Hu Z, Jiang C, Zhu J, et al. Chaos single photon LIDAR and the ranging performance analysis based on Monte Carlo simulation [J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 41658-41670.
- [6] Wang B, Qian J, Zhao T, et al. Anti-jamming performance of chaotic lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0514001-0514006.
- [7] Lin F-Y and Liu J-M. Chaotic lidar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [8] Wang B, Wang Y, Kong L, et al. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 868-870.
- [9] Cheng C-H, Chen C-Y, Chen J-D, et al. 3D pulsed chaos lidar system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12230-12241.
- [10] Chen R, Shu H, Shen B, et al. Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(4): 306-314.
- [11] Li Z-P, Ye J-T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km [J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349
- [12] Maccarone A, McCarthy A, Ren X, et al. Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33911-33926.
- [13] Tobin R, Halimi A, McCarthy A, et al. Three-dimensional single-photon imaging through obscurants [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4590-4611.
- [14] Zhang Y, He Y, Yang F, et al. Three-dimensional imaging Lidar system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(11): 111101.
- [15] Zhang C, Zhang N, Ma Z, et al. A 240×160 3D-Stacked SPAD dToF Image Sensor With Rolling Shutter and In-Pixel Histogram for Mobile Devices [J]. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*, 2021, 2(3): 3-11.
- [16] Fang Y, Xin Z, Yan H, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 42(12): 3234-3238.
- [17] Huang K, LI S and MA Y. Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1110001-1110006.
- [18] Zhang F, Du P, Liu Q, et al. Adaptive strategy for CPPM single-photon collision avoidance LIDAR against dynamic crosstalk [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12237-12250.
- [19] Hwang I-P and Lee C-H. Mutual Interferences of a True-Random LiDAR With Other LiDAR Signals [J]. *IEEE Access*, 2020, 8(12): 124123-124133.
- [20] Du B, Pang C, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-6.
- [21] Yu Y, Liu B and Chen Z. Improving the Performance of Pseudo-Random Single-Photon Counting Ranging Lidar [J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 1-13.
- [22] Hao J, Gong M-l, Du P-f, et al. Ultra-low power anti-crosstalk collision avoidance light detection and ranging using chaotic pulse position modulation approach [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(7): 1-8.
- [23] Liu B, Yu Y, Chen Z, et al. True random coded photon counting Lidar [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(2): 190041-190046.
- [24] Tsai C-M and Liu Y-C. Anti-interference single-photon LiDAR using stochastic pulse position

-
- modulation [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 439-442.
- [25] Hu Z, Zhu J, Jiang C, et al. Improving the ranging performance of chaos LiDAR [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(14): 3598-3605.
- [26] Gatt P, Johnson S and Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3261-3276.
- [27] Wang D, Wang L, Zhao T, et al. Time delay signature elimination of chaos in a semiconductor laser by dispersive feedback from a chirped FBG [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10911-10924.