

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, 13(2): 29-38.

Hu ZH, Zhu JG, Jiang CH. Digital chaos LiDAR [J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(2): 29-38.

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 混沌激光雷达具有分辨率高、抗干扰和隐蔽性强的优点, 然而受限于混沌光源的功率、线性探测器的灵敏度以及硬件带宽, 其在远距离探测方面存在瓶颈。为解决这一问题, 该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, 该文研究了连续混沌激光雷达(continuous-wave 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, 在探测概率大于 95%, 虚警概率小于 5% 的置信区间内, 数字混沌激光雷达的探测距离相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 TN 249 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230724001

Digital Chaos LiDAR

HU Zhihong^{1,2} ZHU Jingguo^{2*} JIANG Chenghao²

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

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

*Corresponding Author: zhujingguo@ime.ac.cn

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 and conducts theoretical analysis and simulation verification. Through

收稿日期: 2023-07-24 修回日期: 2023-10-16

作者简介: 胡志宏, 博士, 研究方向为单光子激光雷达; 朱精果(通讯作者), 研究员, 研究方向为光子集成与激光雷达,

E-mail: zhujingguo@ime.ac.cn; 姜成昊, 副研究员, 研究方向为激光雷达。

Monte Carlo simulation, this paper 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.

Keywords 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分辨率高、抗干扰和隐蔽性强的优点^[6]。2004年, Lin 等^[7]首次提出连续混沌激光雷达的概念,并进行了测距验证。2008年, Wang 等^[8]实验证明了连续混沌激光雷达对多目标的实时探测能力。2018年, Lin 等在前期基础上提出了一种 3D 脉冲混沌激光雷达,实现了 100 m 目标、4 mm 精度的三维成像^[9]。2023年,王兴军等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,混沌激光雷达在远距离目标探测与成像方向上受到了混沌激光光源的功率、线性探测器的灵敏度及硬件带宽的极大限制。要想实现更远目标的探测与成像,就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。

20世纪90年代以来,单光子探测技术的蓬勃发展极大地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、数字化输出及大规模阵列化,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及面对复杂的应用场景,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。与伪随机编码技术相比,物理随机编码技术在理论上具有更强的抗干扰能力。2020年, Liu 等^[23]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。同年, Tsai 等^[24]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。

受上述工作启发,本文首次将混沌激光雷达技术与单光子探测技术结合,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。与传统线性雪崩探测器相比,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。与连续混沌激光雷达及脉冲混沌激光雷达相比, 数字混沌激光雷达用单光子探测器代替了传统线性探测器, 不再需要模数转换器采样与量化, 其信号采集与处理是全数字化的^[25]。因此, 不再受限于模数转换器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。本文对数字混沌激光雷达进行了理论研究与仿真分析, 包括测距原理与可行性分析、探测概率、虚警概率及探测距离。与连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达相比, 数字混沌激光雷达在 10 mW 的平均发射功率条件下探测距离分别提高了约 35 倍、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的结构如图 1 所示。混沌激光通过准直透镜后被分束器一分为二: 一路作为参考光, 一路作为探测光。单光子雪崩探测器 (single photon avalanche detector, SPAD) 1 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发射, 照射到目标物后发生漫反射, 经光学接收系统后聚焦到 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。

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:

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

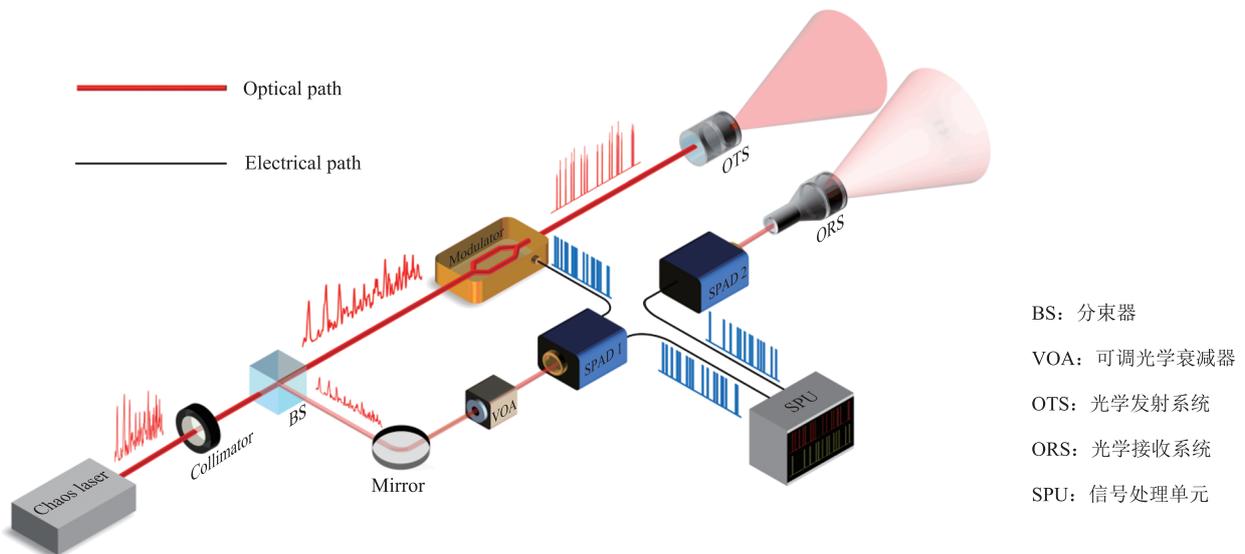


图 1 数字混沌激光雷达结构

Fig. 1 Structure of digital chaos LiDAR

其中, η_{qe} 为 SPAD 的量子效率; ψ_{Solar} 为背景光的光子辐照度; ψ_{dc} 为暗计数率。则任意时间门(时间数字转换器的时间分辨率) Δt_1 内的平均初始光电子数可以表示为:

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

本团队认为, 当参考信号与回波信号的光子数较少时, 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:

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

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是随机变化的, 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:

$$P_{\text{return}}(t) = a(t - \tau_{\text{target}}) \cdot \left(\frac{FOV}{\theta_{\text{T}}} \right)^2 \frac{\rho A_{\text{R}}}{\pi R^2} \eta_{\text{R}} \eta_{\text{T}} T^2 \cos \theta_{\text{target}} \quad (5)$$

其中, $\tau_{\text{target}} = \frac{2R}{c}$, 为探测信号的往返时间; R 为探测距离; c 为光速; FOV 为接收视场角; θ_{T} 为发射光束发散角; ρ 为目标反射率; A_{R} 为接收孔径面积; η_{R} 为接收系统的透射率; η_{T} 为发射系统的透射率; T 为大气透射率; θ_{target} 为激光光束与目标物表面法线的夹角。

SPAD 2 接收回波信号后转化的平均初始光电子辐照度可以表示为:

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

则任意时间门 Δt_2 内的平均初始光电子数可以表示为:

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

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:

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

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:

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

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

3 理论模型与分析

3.1 物理随机序列的产生及特性

从上述测距原理分析中可知, 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。由于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。

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:

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

为了验证数字混沌激光雷达测量原理的可行性, 本文对 SPAD 响应混沌激光的结果进行蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真。在仿真中, 混沌光源的仿真参数见参考文献[27], 其他参数如表 1 所示。

如图 3(a) 所示, 对蒙特卡洛仿真产生的随机

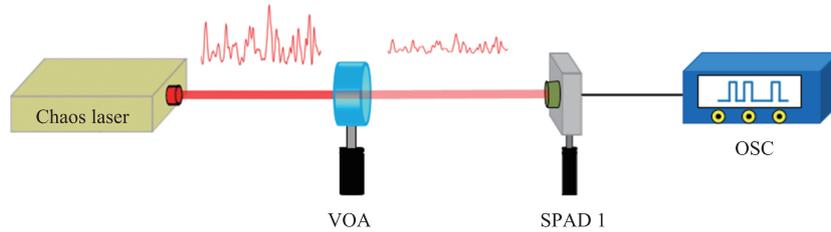


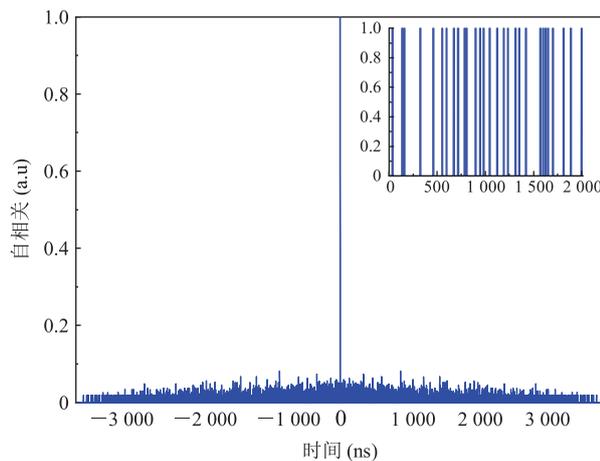
图 2 物理随机序列产生示意图

Fig. 2 Schematic of physical random sequences generation

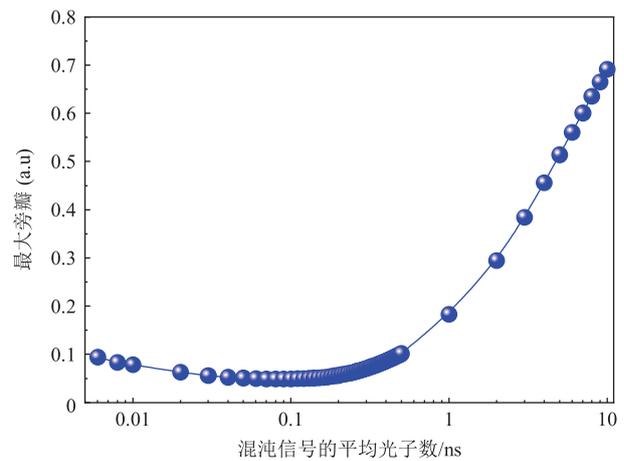
表 1 用于产生物理随机序列的仿真参数

Table 1 Simulation parameters for generating physical random sequence

波长 (nm)	死区时间 (ns)	光子探测效率	时间仓 (ps)	暗计数 (kHz)	背景噪声 (MHz)	代码宽度 (ns)	序列长度 (μs)	平均光子数 (ns^{-1})
1 550	20	20%	200	20	50	1	12	0.01~10



(a) 自相关曲线



(b) 自相关曲线的最大旁瓣

图 3 物理随机序列的自相关特性

Fig. 3 Auto-correlation properties of physical random sequence

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息息相关。随着混沌激光的平均光子数从 $0.01/\text{ns}$ 增至 $10/\text{ns}$, 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, 随机序列中的“1”码元个数较

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 $0.1/\text{ns}$, 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)。

3.2 数字混沌激光雷达系统仿真

本节利用蒙特卡洛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，其仿真流程如图4所示。为了更接近真实情况，每个参数变量进行了10 000次蒙特卡洛仿真，即 $k=10\ 000$ 。

其中，混沌光源、SPAD 1的仿真参数同第3.1小节，SPAD 2的仿真参数基本与SPAD 1保持相同，序列长度设置为 $20\ \mu\text{s}$ ，其他系统仿真参数如表2所示。

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：

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

通过蒙特卡洛仿真，本文对100 m的目标进行了测距分析，结果如图5所示。图5(a)是参考混沌信号，图5(b)是SPAD 1生成的参考随机序列，图5(c)是经参考序列调制的发射信号，图5(d)是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100 m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。

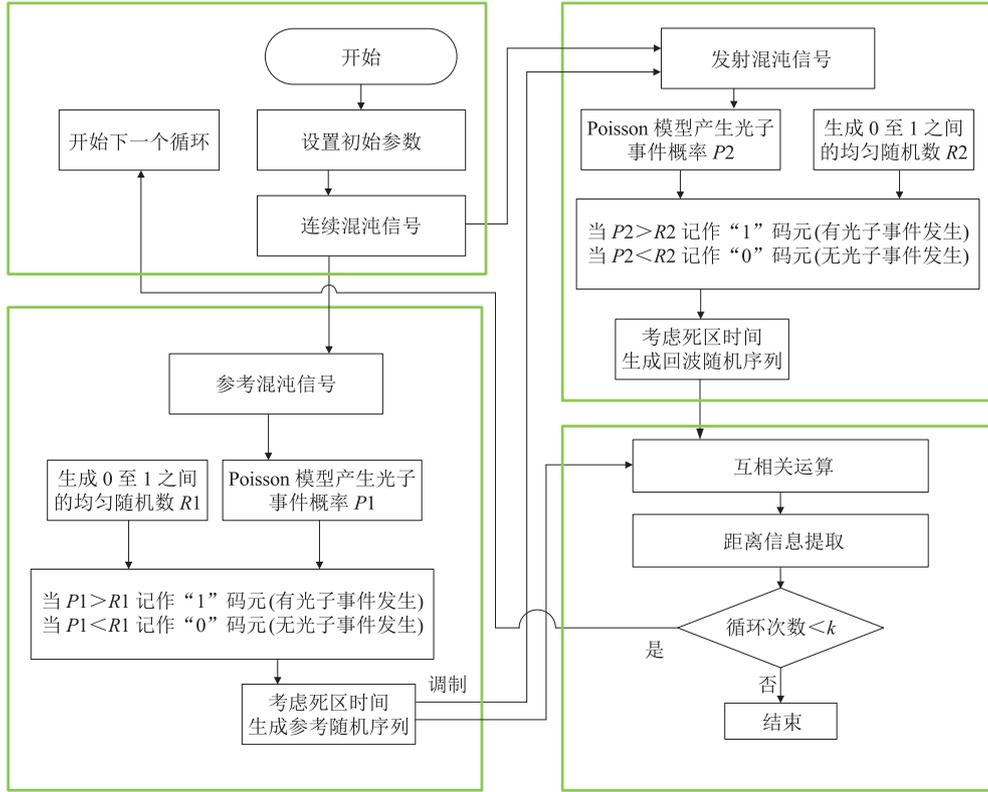


图4 Monte Carlo 仿真流程

Fig. 4 Monte Carlo simulation process

表2 数字混沌激光雷达系统仿真参数^[22]

Table 2 Simulation parameters of digital chaos LiDAR system^[22]

混沌激光器的平均功率 (mW)	扩展激光束的发散角 (mrad)	单路径传输效率	目标反射率	发射器光学效率	接收器光学效率	接收器孔径面积 (m ²)	目标距离 (m)
10	20	1	0.1	0.4	0.7	12.56×10^{-4}	100

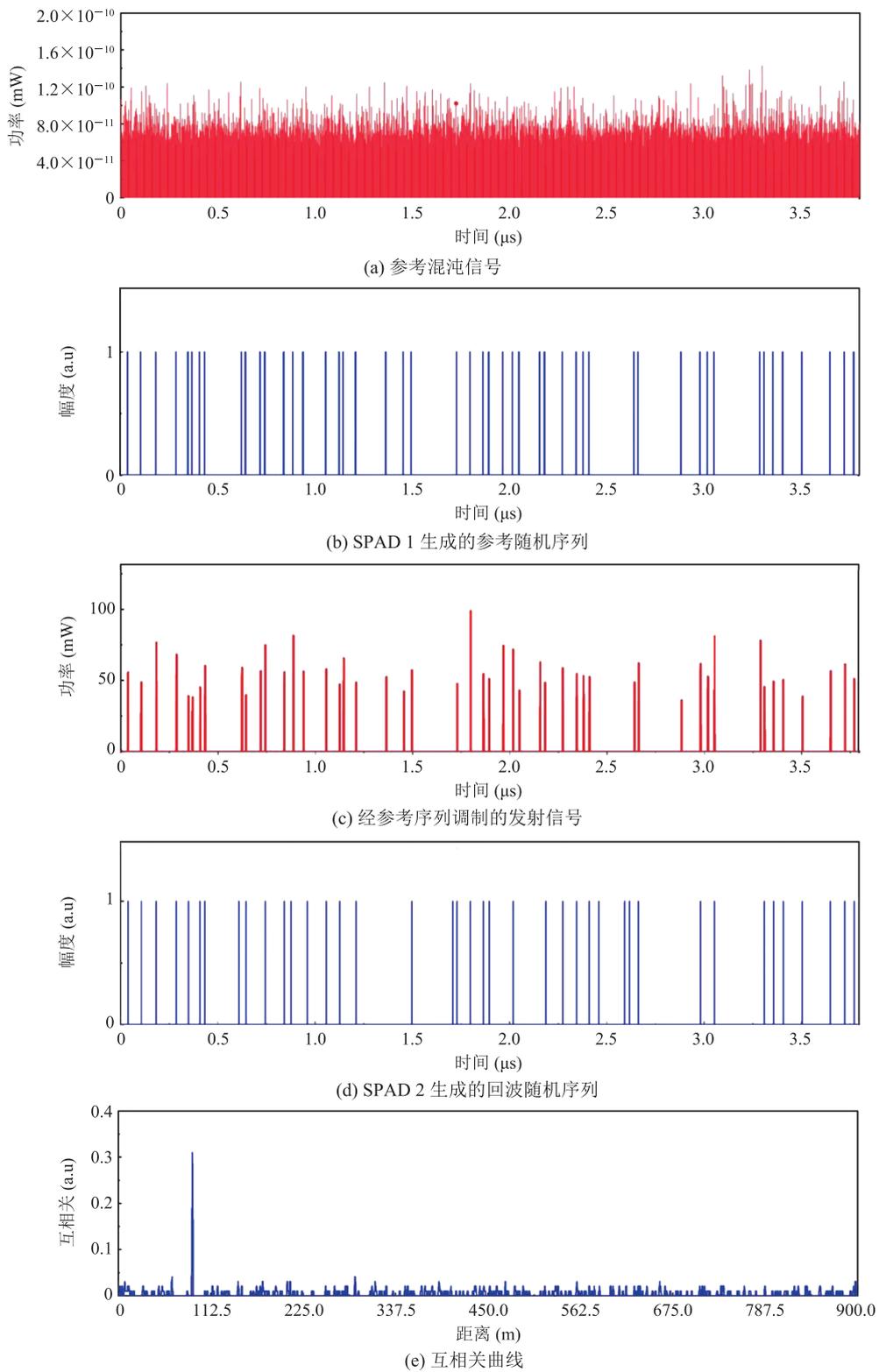


图 5 数字混沌激光雷达测距

Fig. 5 Digital chaos LiDAR ranging

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。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的变化曲线。首先定义激光雷达系统的信噪比 (signal-to-noise ratio, R_{SN}) 如公式 (13) 所示。

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

其中, σ_{noise} 为互相关曲线背景噪声的标准偏差。为了更加真实准确地模拟激光雷达系统的探测概率与虚警概率, 本文对每个仿真参数进行了 10 000 次蒙特卡洛仿真, 仿真参数同第 3.2 小节。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在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)~(b) 可以看出, 当两类混沌激光系统的探测概率达到 95% 时, 其 R_{SN} 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 R_{SN} 阈值为 7.8 dB, 如图 6(c) 所示。这意味着数字混沌激光雷达需要较高的 R_{SN} 才能达到置信区间。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。

4.2 探测距离

通过蒙特卡洛仿真, 本文对比了连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达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, 无论目标反射率为 0.1, 还是 0.9, 数字混沌激光雷达的探测范围较连续混沌激光雷达、脉冲混沌激光雷达分别提高了约 35 倍、8 倍。在 10 mW 的平均发射功率下, 数字混沌激光雷达在 0.9 的目标反射率下最远探测距离可达 915 m。

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, 且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。在探测概率大于 95%、虚警概率小于 5% 的置信区间内, 数字混沌激光雷达的探测距离较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、8 倍。与 Cheng 等^[9]中的脉冲混沌激光雷达相比, 数字混沌激光雷达将探测距离从百米量级提升至千米量级。此外, 与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) 相

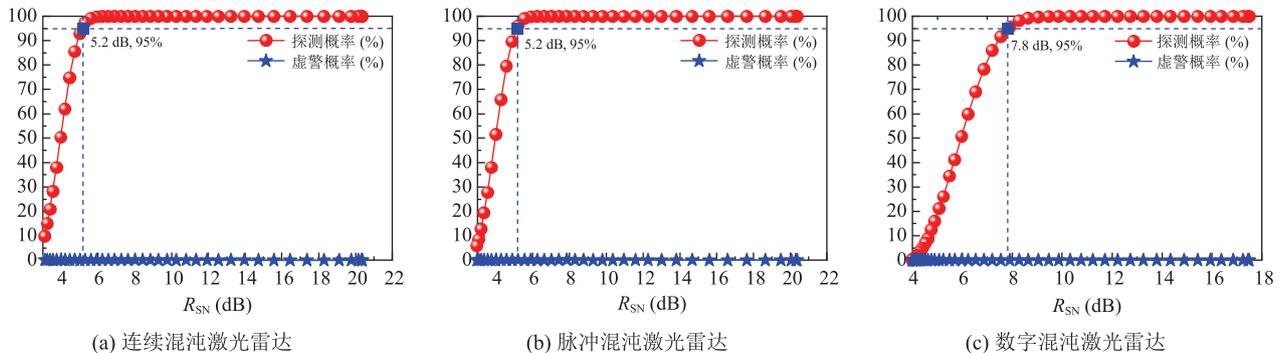


图 6 探测概率与虚警概率

Fig. 6 Detection probability and false probability

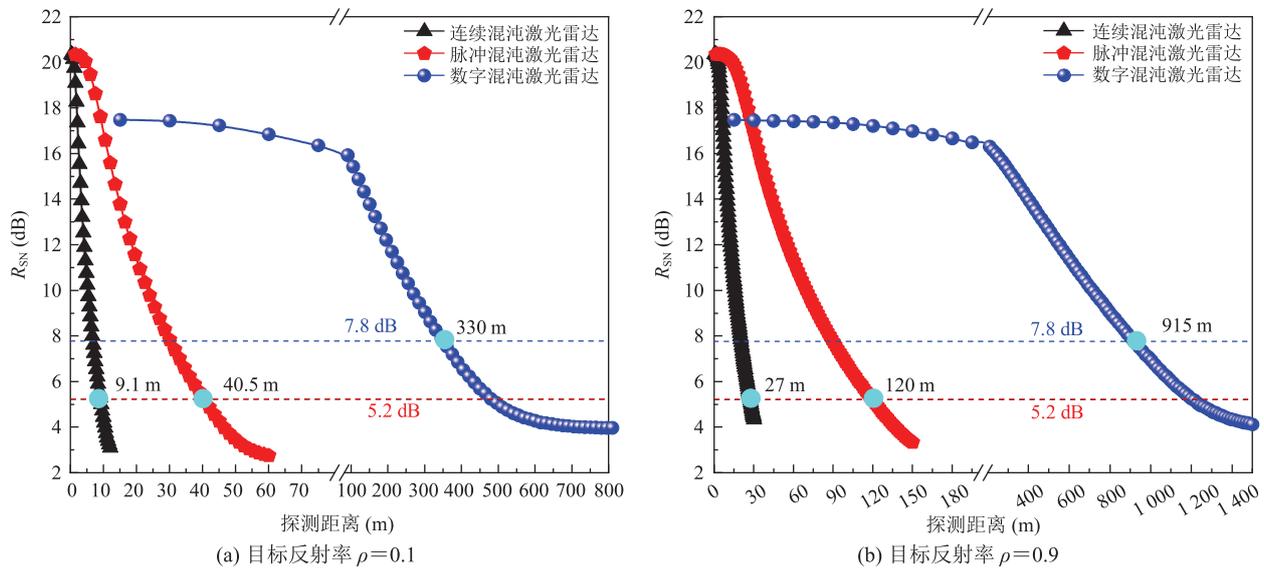


图 7 探测距离对比

Fig. 7 Comparison of detection range

比, 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。与物理随机编码的单光子探测系统相比, 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, 调控更加简便快捷。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 BT, Shu HW, Xie WQ, et al. Harnessing microcomb-based parallel chaos for random number generation and optical decision making [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4590.
- [3] Wang CY, Li J, Zhou X, et al. Chaos Raman distributed optical fiber sensing [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 213.
- [4] Lukashchuk A, Riemensberger J, Tusnín A, et al. Chaotic microcomb-based parallel ranging [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(9): 814-821.
- [5] Hu ZH, Jiang CH, Zhu JG, 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] 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 BJ, Qian JJ, Zhao T, et al. Anti-jamming performance of chaotic lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0514002.
- [7] Lin FY, Liu JM. Chaotic lidar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [8] Wang BJ, Wang YC, Kong LQ, et al. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 868-870.
- [9] Cheng CH, Chen CY, Chen JD, et al. 3D pulsed chaos LiDAR system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12230-12241.
- [10] Chen RX, Shu HW, Shen BT, et al. Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(4): 306-314.
- [11] Li ZP, Ye JT, Huang X, et al. Single-photon imaging

- over 200 km [J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [12] Maccarone A, McCarthy A, Ren XM, 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 YF, 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 ZJ, 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] 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0208001.
Yang F, Zhang X, He Y, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0208001.
- [17] 黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1110001.
Huang K, Li S, Ma Y, et al. Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1110001.
- [18] Zhang F, Du PF, 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 IP, Lee CH. Mutual interferences of a true-random LiDAR with other LiDAR signals [J]. *IEEE Access*, 2020, 8(12): 124123-124133.
- [20] Du BC, Pang CK, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4198.
- [21] Yu Y, Liu B, Chen Z. Improving the performance of pseudo-random single-photon counting ranging LiDAR [J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3620.
- [22] Hao J, Gong ML, Du PF, 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): 074207.
- [23] Liu B, Yu Y, Chen Z, et al. True random coded photon counting LiDAR [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(2): 190044.
- [24] Tsai CM, Liu YC. Anti-interference single-photon LiDAR using stochastic pulse position modulation [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 439-442.
- [25] Hu ZH, Zhu JG, Jiang CH, et al. Improving the ranging performance of chaos LiDAR [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(14): 3598-3605.
- [26] Gatt P, Johnson S, Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3261-3276.
- [27] Wang DM, Wang LS, 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.