

基于大规模阵列单光子雪崩二极管探测应用的编码方式研究

潘庆愉, 王超*, 任嘉伟, 王大鹏, 朱义君

战略支援部队信息工程大学信息系统工程学院, 河南 郑州 450000

摘要 单光子雪崩二极管 (SPAD) 阵列探测器常被用作空间远距离目标的测距和三维成像。为快速获取光子数据, SPAD 阵列探测系统一般选用高重复频率的探测体制。目前, 主要采用随机序列对脉冲进行编码的方法来抑制高重复频率引起的距离模糊效应。为了在接收端对阵列像素实现有效区分, 而且各周期内的编码波形不相互串扰, 需要数量庞大且可保持相互正交的随机编码序列。本文提出了使用混沌序列对 SPAD 阵列进行编码的思路, 并通过分析 Lyapunov 指数的值域变化, 提出了复合型 Logistic 序列的优化编码方案。为确保阵元间的互扰不会影响最终的探测效果, 提出了峰值旁瓣差 (PSLD) 的概念, 并对阵列间互相关积累的影响进行了定量分析。依据峰值旁瓣差对生成的混沌序列进行了筛选, 以保证其能够满足所需阵列规模的抗互扰要求。最后给出了具体的编码流程。

关键词 探测器; 单光子探测阵列; 混沌序列; 峰值旁瓣差; 级联编码

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221187

1 引言

单光子雪崩二极管 (SPAD) 具有光子级别的探测灵敏度, 可以利用微弱的光信号实现测距及成像^[1]。SPAD 探测器一般选取高重复频率的探测体制, 以便快速获取大量时间-光子数据, 但该体制会导致系统出现距离模糊问题^[2]。一般采用随机序列对脉冲进行编码的方式来解决该问题。由于激光观测视场较小, 在远距离探测中需要将多个 SPAD 组成大规模探测阵列来提高面积覆盖率, 通过并行的多个探测像素阵元来获取更加完整的目标信息。在大规模阵列的编码过程中, 必须要考虑编码序列的可用数量和抗串扰能力等。

目前, SPAD 探测主要采用以 m 序列为代表的伪随机序列进行编码。受制于固定的编码长度与形式, m 序列无法根据设计需求调整序列长度, 冗长的序列对探测实时性的影响尤为明显。有学者提出利用真随机序列进行编码, 但真随机序列的生成效率较低, 且结果难以控制和复现, 难以满足大规模 SPAD 阵列的编码探测需求^[3]。混沌序列的随机特性类似于噪声^[4], 具有抗干扰特性强、编码格式灵活的特点, 已被广泛应用于激光雷达测距中^[5]。若利用混沌序列对光子脉冲进行编码, 则可以有效避免真、伪随机序列的短板, 如数量不足、码长冗余、生成效率较低等。

业界已经对混沌序列的抗干扰性能进行了较为详

细的研究, 如: 张天舒等^[6]验证了混沌激光雷达的抗干扰性能, 指出了其在高信号干扰比条件下被严重干扰的问题; Feng 等^[7]建立了数字混沌抗干扰激光雷达系统, 得出了不同频率的噪声对混沌激光探测的影响; 张民等^[8]将多次混沌信号的相关结果进行积累, 有效降低了互相关作用对信号检测的干扰。以上学者研究的均是单一干扰源对信号相关峰识别能力的影响, 并未考虑阵元间编码的互扰效应。对于 SPAD 阵列, 任意到达器件表面的光子信号均可引起等值的光电流概率响应, 某一阵元接收到的信号等可能地来自多个发射信号。这使得探测结果会受到这些信号的共同干扰, 进而出现虚警和误判。

为此, 笔者针对远距离大规模 SPAD 阵列的探测需求, 分析了选择混沌随机序列进行编码的优势。针对单级混沌序列可能出现的动力学退化问题, 提出了复合型 Logistic 序列的优化编码方案。为量化各阵元间编码互扰对探测结果的影响, 提出了峰值旁瓣差的概念, 并据此对生成的混沌序列进行筛选, 以保证其能够满足所需阵列规模的抗互扰要求。最后, 给出了编码的实现方法。

2 编码特性分析

2.1 脉冲编码探测的需求

基于 SPAD 探测器的光子飞行时间 (PToF) 技术

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-18; 录用日期: 2022-10-21; 网络首发日期: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (62071489, 61901524)、国家重点研发计划 (2018YFB1801963)

通信作者: *xxgcwangchao@163.com

在激光测距领域被广泛应用。为准确提取目标位置，SPAD 阵列探测系统一般选用高重复频率的探测体制实现目标的充分采样。此时，目标距离 R 的计算公式为

$$R = \frac{c}{2}(n_0 T + t), \quad (1)$$

式中： c 为光速； T 表示发射脉冲周期； n_0 代表重复频率的周期数； t 表示不模糊时间 ($t < T$)，对应的最大无模

糊距离为 $cT/2$ 。对于典型的单光子探测系统， T 一般在 10^{-6} s 附近取值，对应最大无模糊探测距离不超过百米量级，难以满足较远距离的探测需求^[9]。为此，一般利用随机编码序列调制激光发射脉冲，SPAD 阵列接收回波信号后与原始序列进行相关运算，测得激光发射到相关峰值的时间间隔即脉冲序列的往返时间，再通过距离与时间的关系便可获得目标的位置信息^[10]。SPAD 阵列编码探测的原理如图 1 所示。

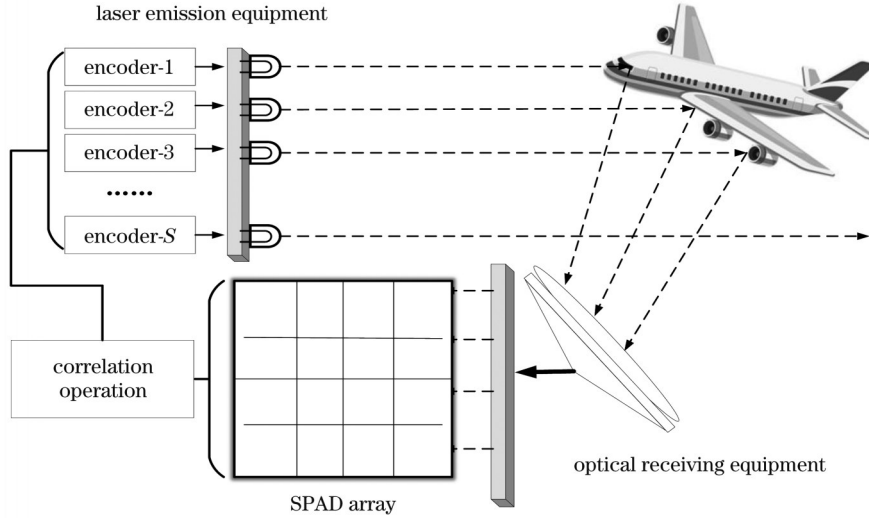


图 1 SPAD 阵列编码探测原理

Fig. 1 Principle of coded SPAD array detection

经编码调制后，探测系统的最大无模糊探测距离为

$$R_{\max} = \frac{N_L \cdot c}{2f_m}, \quad (2)$$

式中： f_m 为编码的比特流发送速率； N_L 代表编码序列

的位数^[11]。为了保证每个码元都被 SPAD 响应， f_m 一般小于 SPAD 探测器死时间的倒数 ($1/T_{\text{dead}}$)。理论上，只需要增加 N_L ，即可获得所需的单值探测范围。当不考虑编码的互相关作用时，各阵元编码的相关峰波形如图 2 所示。

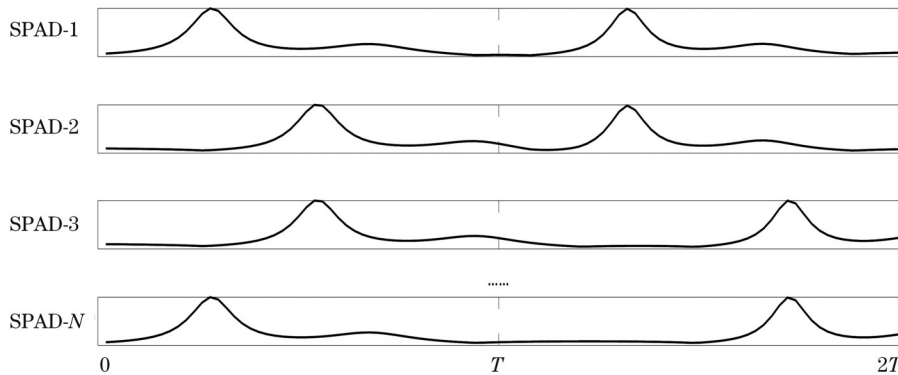


图 2 阵列中各阵元编码相关峰波形的示意图

Fig. 2 Schematic of coding correlation peak waveform of each array element in the array

较长的编码序列可以保证序列较优的相关性，但冗长的序列会直接影响测距成像的实时性。本文用单像素滞留时间 t_{pixel} 表示某一阵元接收光子所需的时间，其表达式为

$$t_{\text{pixel}} = 2R_{\max}/c + (N_L - 1)\Delta t \geq 2R_{\max}/c + (N_L - 1) \cdot T_{\text{dead}} \geq (2N_L - 1)T_{\text{dead}}, \quad (3)$$

式中： Δt 代表单个码元的接收时间。可以看到，SPAD 接收信号的时间与编码长度线性正相关。SPAD 接收编码的过程是一个离散过程，一般通过卷积运算来求解相关结果，解码运算的时间复杂度与码长正相关^[12]。因此，编码长度越短，对整个探测系统的实时性越有利。

为了在接收端对阵列像素实现有效区分,各阵元的编码应保持相互正交。受波形持续时间、硬件系统实现精度等因素的制约,理想正交波形几乎不可能获得,实际系统中的编码均具有一定程度的互相关性。为了保证探测的准确性,需要保证互相关的结果不能影响对自相关峰的识别。

2.2 真伪随机序列的不足

目前,SPAD 探测的编码主要分为伪随机序列编码和真随机序列编码两类。 m 序列作为应用最广泛的伪随机序列,具有良好的随机性和相关性^[13]。 m 序列由线性移位寄存器产生, L 阶线性移位寄存器能够产生同周期的 m 序列的个数为

$$N_m = \varphi(2^L - 1)/L, \quad (4)$$

式中: L 阶 m 序列的编码位数 $N_L = 2^L - 1$; $\varphi(N_L)$ 是欧拉函数,表示正整数集合 $\{1, 2, \dots, N_L\}$ 中与 N_L 互质的整数的数量^[14]。由于生成的序列数量 N_m 远远小于其编码位数 N_L ,在大规模阵列中应用会出现可用数量不足的问题。此外,受限于相对固定的编码长度与形式, m 序列无法根据实际设计需求产生给定长度的编码。如果将 SPAD 死时间控制在 100 ns 以内,就可令接收编码的调制速率 $f_m = 10$ Mbit/s,再由式(2)可得到满足 10 km 无模糊探测距离的编码位数应在 66667 以上。但由于结构原因, m 序列最短只能取 131077,无用的编码位数占整体的 49.1%,造成了编码资源和处理时间的无效损耗。

真随机编码序列通过硬件设备以完全物理随机的方式产生,具有极强的抗串扰能力。理论上,真随机发生器的对熵源进行采样的输出序列中的“0”“1”码元的数量应该是无偏的,但在实际电路实现中,受物理环境中各类因素的影响,真随机数发生器输出序列中的“0”“1”并不均匀且不可预测,既难以保证所生成编码序列的质量,也不便于对系统探测效果进行检验。此外,产生真随机序列需要额外添加物理熵源,从而导致系统硬件组成复杂并且编码生成效率较低。

2.3 混沌随机序列的优势

混沌系统具有初值敏感性,细微的差别经系统迭代后会产生完全不相关的信号,这一特性使得混沌系统能够产生具有理想相关特性、强抗干扰特性的随机序列。SPAD 阵列探测所用的激光脉冲信号具有时间离散特性,其所适用的混沌序列可以定义为

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad 0 < x_n < 1, n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (5)$$

当初始条件 x_0 确定后,经过 n 次迭代后就能产生符合时间离散系统的集合 $\{x_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$ 。当给定的初值满足某些特殊混沌映射关系时,就能够产生混沌实值序列。经典的映射模型有 Chebyshev 映射、Tent 映射、Logistic 映射和改进型 Logistic 映射等。为了适应 SPAD 阵列探测的要求,需要结合门限判据方法,将混沌实值序列转换成二进制混沌序列。该序列依然具有混沌的随机无周期性和信号间正交性,其生成方式如表 1 所示。

表 1 4 种混沌序列的映射方式及二值化判决门限^[15]

Table 1 Mapping method and binarization threshold of four chaotic sequences^[15]

Sequence type	Mapping method	Probability density function	Threshold	Remark
Chebyshev sequence	$x_{n+1} = \cos[p \arccos(x_n)],$ $x_n \in (-1, 1)$	$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{1-x^2}}, & -1 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	0	Symbol p denotes an integer greater than or equal to 2
Tent sequence	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{a}, & 0 < x_n < a \\ \frac{1-x_n}{1-a}, & a \leq x_n \leq 1 \end{cases}$	$\rho(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	0.5	Probability density is the distribution of standard type mapping, where $a = 0.5$
Logistic sequence	$x_{n+1} = \mu x_n(1-x_n), x_n \in (0, 1)$	$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{x(1-x)}}, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	0.5	Probability density is the distribution of full mapping, where $\mu = 4$
Improved Logistic sequence	$x_{n+1} = 1 - \lambda x_n^2, x_n \in (-1, 1)$	$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{1-x^2}}, & -1 < x < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	0	Probability density is the distribution of full mapping, where $\lambda = 2$

在阵列编码探测中,通常将峰值旁瓣比(PSLR)作为阵列内各编码相关性的评价指标。该值定义为相关峰的强度与最强旁瓣峰值的比值。PSLR 值越大,表示同等条件下对系统相关峰位置的判别能力和抗干扰能力越强。为方便与 m 序列探测效果进行比较,将码元数量设定为 65535 个(由式(2)可得其无模糊探测

距离为 9.8 km)。 m 序列和 4 种混沌编码序列的编码情况以及自相关、互相关情况如图 3 所示。

从仿真结果来看,以上 4 种混沌随机序列与 m 序列具有相似的表现形式,可以在相同的光学调制设备和激光发射设备中替换 m 序列。与 m 序列类似,4 种混沌序列的自相关图形近似于理想的图钉形,与冲激

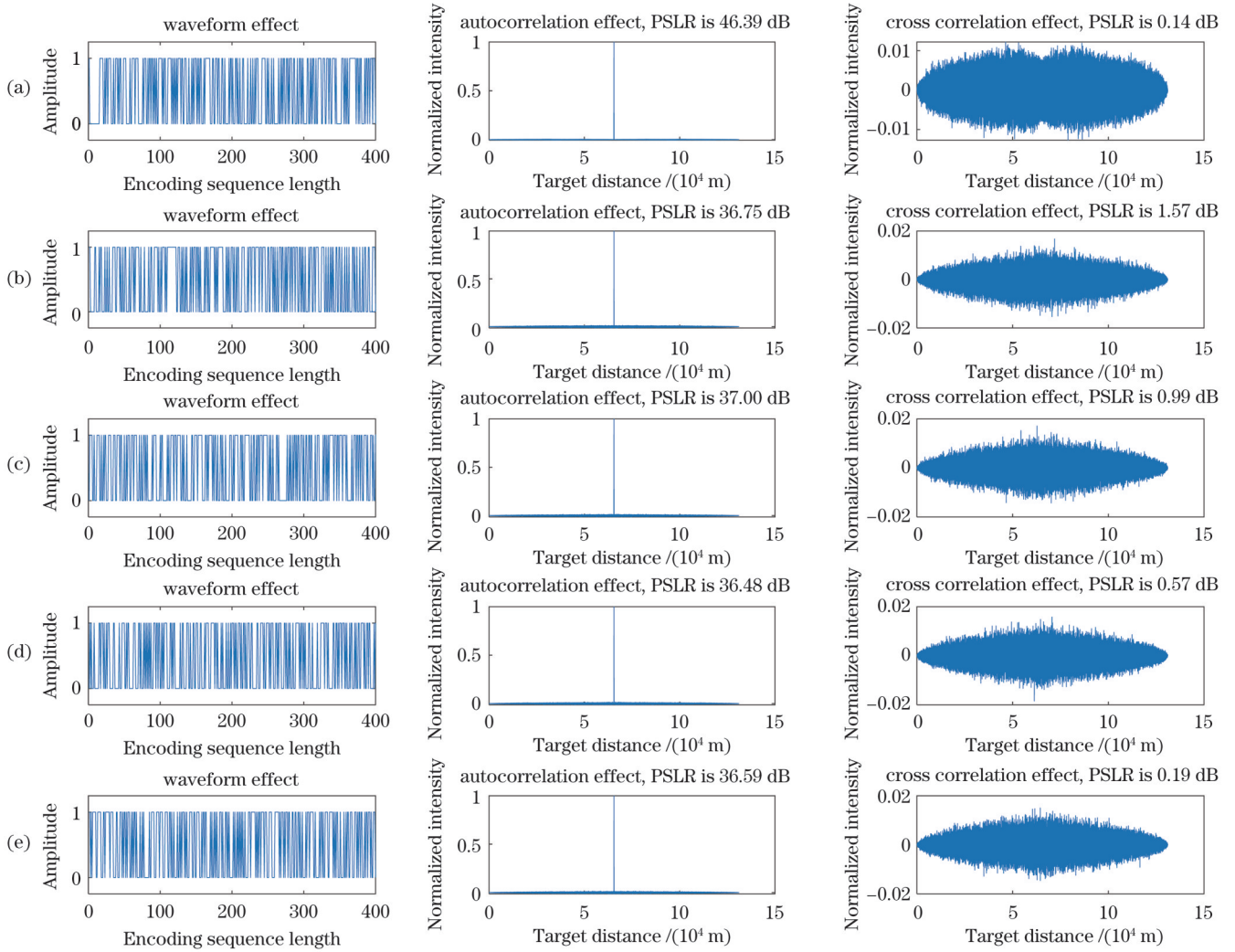


图 3 各序列码型结构及相关特性的仿真结果。(a) m 序列; (b) Chebyshev 序列; (c) Tent 序列; (d) Logistic 序列; (e) 改进型 Logistic 序列

Fig. 3 Simulation results of code structure and correlation characteristics of each sequence. (a) m -sequence; (b) Chebyshev sequence; (c) Tent sequence; (d) Logistic sequence; (e) improved Logistic sequence

函数类似,互相关值接近 0,具有较好的相关性质。虽然从 PSLR 的角度看,混沌序列的相关性略低于同长度的 m 序列,但由于混沌系统具有初值敏感性,可以产生数量众多、长度任意指定的随机序列,能够满足大规模阵列探测的编码需求,且不会因编码冗余而造成额外的时延。与真随机序列不同,混沌序列的产生和接收可以被控制,相同的初值经过相同的迭代模型后会产生同样的结果,因此可以实现对探测系统性能的验证。

3 阵列编码设计

3.1 编码抗干扰能力分析

在 SPAD 阵列探测过程中,各阵元会不可避免地接收到其他阵元像素的目标回波,导致阵元间存在一定的信号交叠。假设受调制的激光为均匀的脉冲函数,在不考虑噪声干扰的条件下,阵元 i 经过飞行时间 τ 后接收的回波序列可以表示为

$$R_{array,i}(\tau) = P_d \left[a_i \left(N - \left\lfloor \frac{\tau}{\Delta t} \right\rfloor \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^S b_{i,j} \left(N - \left\lfloor \frac{\tau_{i,j}}{\Delta t} \right\rfloor \right) \right], \quad (6)$$

式中: P_d 表示码元脉冲被 SPAD 响应的概率; S 代表阵列的规模, $a_i(\cdot)$ 表示阵元 i 对应的发射序列; Δt 表示码元的时隙; $b_{i,j}(\cdot)$ 表示阵元 i 接收到的其他阵元 j 对应接收的回波序列; $\tau_{i,j}$ 代表 $b_{i,j}(\cdot)$ 所在脉冲的飞行时间; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整^[16]。接收序列与发送序列进行相关运算的结果 $C_{array}(\tau)$ 可以表示为

$$C_{array,i}(\tau) = \sum_{N=0}^{N_i-1} P_d a_i(N) a_i \left(N - \left\lfloor \frac{\tau}{\Delta t} \right\rfloor \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^S \sum_{N=0}^{N_i-1} P_d b_{i,j} \left(N - \left\lfloor \frac{\tau_{i,j}}{\Delta t} \right\rfloor \right) a_i(N), \quad (7)$$

式(7)等号后两项分别对应自相关结果和互相关累积结果。

为了实现探测结果的精确区分,必须确保任意阵

元的自相关峰要远远高于阵列中其他阵元造成的互相关峰累积的影响。PSLR 是一个比值,无法从量上比较阵列中互相关累积对自相关结果的影响,因此,本文

提出了峰值旁瓣差(PSLD)的概念,用于表示相关峰值与最高旁瓣值的归一化差值。不同序列的PSLD随距离(码长)的变化如表2所示。

表2 不同序列归一化PSLD随距离(码长)的变化

Table 2 Variation of normalized PSLD of different sequences with distance (code length)

Sequence type	Normalized PSLD					
	$R_{\max}=2.45 \text{ km}(N_L=16383)$		$R_{\max}=4.9 \text{ km}(N_L=32767)$		$R_{\max}=9.8 \text{ km}(N_L=65535)$	
	Autocorrelation	Cross-correlation/ 10^{-4}	Autocorrelation	Cross-correlation/ 10^{-4}	Autocorrelation	Cross-correlation/ 10^{-4}
<i>m</i> -sequence	0.9912	18.9221	0.9933	3.9674	0.9852	1.9837
Chebyshev sequence	0.9709	6.7139	0.9792	14.0381	0.9855	27.6184
Tent sequence	0.9717	4.2725	0.9806	2.7466	0.9844	6.5440
Logistic sequence	0.9759	34.7900	0.9751	18.9209	0.9850	10.0708
Improved Logistic sequence	0.9737	12.8174	0.9810	4.8828	0.9852	3.2043

为了防止阵元间的相互干扰对探测结果产生影响,一个阵列上最多可同时容纳的阵元数量 S 与第 i 个编码序列的自相关和互相关峰值旁瓣差之间存在以下关系:

$$\lambda(i) = D_{\text{auto}}(i) - \sum_{j=1, j \neq i}^S D_{\text{corr}}(i, j), \quad (8)$$

式中, D_{auto} 和 D_{corr} 分别表示编码序列的自相关和互相关的峰值旁瓣差, $\lambda(i)$ 定义为选择依据函数。若 $\lambda(i) > 0$, 则第 i 个编码序列可以满足 S 规模阵列的峰值抗干扰要求; 若 $\min[\lambda(i), 1 \leq i \leq S] > 0$, 则所选用阵列编码序列均满足 S 规模阵列的需求。

3.2 大规模阵列编码选择

从图3和表2中可以看到,混沌映射生成的序列的相关性普遍较好,但不同的序列间也存在一定区别。在远距离探测条件下,改进型 Logistic 序列的PSLR和PSLD与 m 序列的最为接近,相关性质也相对较优。文献[17]通过对近似熵进行分析,证明了改进型 Logistic 序列的复杂度更高,抗噪声性能更好。因此,下面重点结合改进型 Logistic 序列分析混沌序列在大规模 SPAD 阵列中进行探测的应用场景。

前面分析的混沌映射方式均属于单级混沌映射,结构较为简单且易于实现数字化,可以快速生成大量具有良好相关特性的随机序列[18]。但在实际应用中,单级混沌系统会因硬件设备精度有限而出现动力学退化,导致序列的初值敏感性和随机性受到不同程度的抑制[19],进而使得原本具有非周期特性的序列变成周期序列,而且序列的数量不再具有无限性特征。对于这一问题,可以通过级联的方法提高系统的复杂性。

当两个离散混沌系统的值域相同时,可以通过级联的方式构成一个新的混沌复杂度更高的混沌系统。原始输入 x_0 经过 n 层级联后,输出结果变为 x_n , 它们之

间的迭代关系为

$$x_n = f_n(x_{n-1}) = f_n[f_{n-1}(x_{n-2})] = \dots = f_n\{f_{n-1}[\dots f_1(x_0)]\}, \quad (9)$$

式中: f_k 为每层级联的迭代形式, $1 \leq k \leq n$ 。只有满映射改进型 Logistic 系统才能表现出较强的混沌特性,将其映射函数代入式(9)中,此时级联迭代关系表示为

$$x_n = 1 - 2x_{n-1}^2 = 1 - 2(1 - 2x_{n-2}^2)^2 = \dots \quad (10)$$

由于 $x_0 \in (-1, 1)$, 不妨令 $x_k \in (-1, 1)$ 。由于函数 $y = 1 - 2x^2$ 在 $x \in (-1, 0)$ 区间单调递增,在 $x \in (0, 1)$ 区间单调递减,可以求得在该区间内函数的最大值和最小值分别为 $+1$ 和 -1 , 即迭代值 $x_{k+1} \in (-1, 1)$ 。由数学归纳法可知,对于满映射改进型 Logistic 编码,其级联映射值域均在 $(-1, 1)$ 区间,与级联次数无关。同理可证其他3种混沌编码序列也具有其单一序列的无限级联性,而值域相同的混沌序列进行混合级联编码后也具有相同的性质。

级联前后的混沌序列均具有初值敏感性,即使相近初值产生的序列的性质也有较大差别。为了更适应大规模阵列,需要遴选相关性较优的编码方式。为了将序列的相关性质尽量量化(以便于选择),本文引入了 Lyapunov 指数。Lyapunov 指数反映了序列的随机程度,其大小与序列相关特性的强弱正相关,故可将其作为阵列适用序列的选择依据[20]。序列的 Lyapunov 指数可以定义为

$$L_m = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \left[f_m(x_i) \right]' \right|. \quad (11)$$

对于单级离散混沌映射 $f_1(x_i), f_2(x_i), f_3(x_i), \dots, f_m(x_i) \in \mathbf{R}, x_i \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{N}_+$, 其中 \mathbf{R} 表示实数集, \mathbf{N}_+ 表示正整数集。可以证明级联后系统的 Lyapunov 指数 L_{cascade} 与各子系统的 Lyapunov 指数 (L_1, L_2, \dots, L_m) 存在以下关系:

$$L_{\text{cascade}} = L_1 + L_2 + \dots + L_m \quad (12)$$

单级离散混沌映射的 Lyapunov 指数 $L_1, L_2, \dots, L_m > 0$, 故而级联后的 Lyapunov 指数大于任意子系统的 Lyapunov 指数^[21]。Lyapunov 指数与混沌系统的随机性正相关, 由此可知级联的过程能够改善系统的随机性或复杂性。

在定义域 $x_i \in (-1, 1)$ 范围内, L 中的变量函数 $y = \ln|f_m(x_i)|$ 并不一直都大于 0。如图 4 所示, y 在

级联前后均存在一段小于 0 的过程。在这些区间内, y 对整体的 Lyapunov 指数起消减作用。在 $x_i \in (-0.395, -0.306) \cup (0.306, 0.395)$ 范围内, 改进型 Logistic 映射的 y 值大于级联型 Logistic 序列的 y 值, 如果取两个函数较高的一段, 通过分段映射形成复合型编码序列, 那么该序列的 Lyapunov 指数优于以上两种改进型 Logistic 序列的 Lyapunov 指数。此时, 复合型 Logistic 序列 $F(x_n)$ 可以表示为

$$x_{n+1} = F(x_n) = \begin{cases} 1 - 2x_n^2, & x_n \in (-0.395, -0.306) \cup (0.306, 0.395) \\ 1 - 2(1 - 2x_n^2)^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

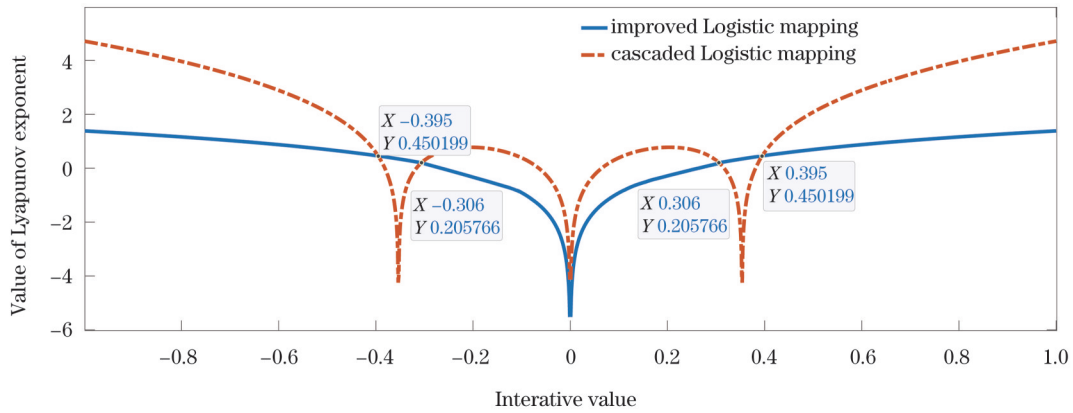


图 4 级联前后的改进型 Logistic 映射的 Lyapunov 指数

Fig. 4 Lyapunov exponent of improved Logistic mapping before and after concatenation

下面以复合型 Logistic 序列为例, 在编码长度为 65535 的条件下将 100 个序列的自相关值与其他序列作差, 得到的效果如图 5 所示。

从图 5 中可以观察到不同序列的差值情况有一定的区别。可以删除 $\lambda(i)$ 较低的序列, 再纳入新的序列, 然后测试 $\lambda(i)$ 。经过多次测试, 最终可使全部阵列编码的抗干扰能力达到较优水平。但对于数量为 S 的

同序列, 需要计算 $C_s^2 = \frac{S(S-1)}{2}$ 组互相关值, 对于远距离探测所需要的长序列来说, 这种选取可用序列的方法要消耗较长时间。如果可以将互相关的 PSLD 简化为相对固定的数值, 就可大幅减小编码过程中的计算量。为此, 对不同长度序列的归一化 PSLD 结果进行了统计, 统计结果如表 3 所示。

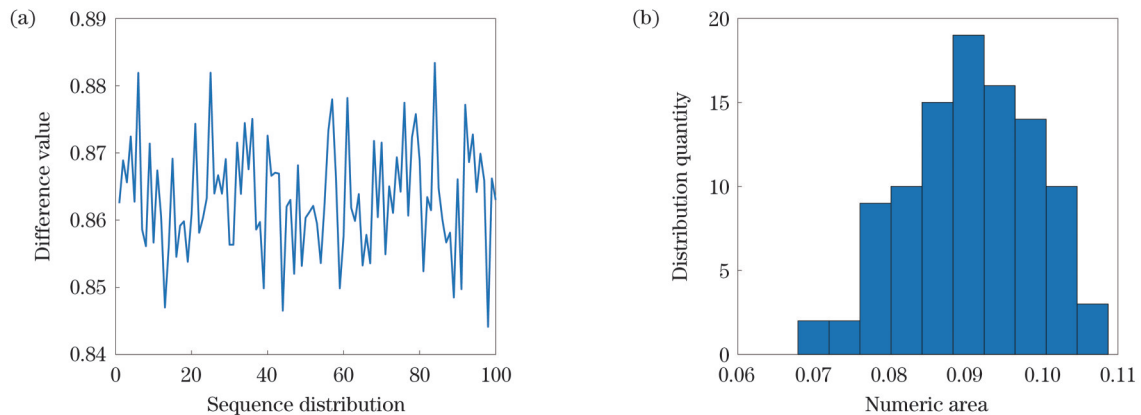


图 5 复合型 Logistic 序列自相关 PSLD 与互相关 PSLD 的变化情况。(a) 自相关 PSLD 与互相关 PSLD 之和的差值; (b) 互相关 PSLD 之和的分布

Fig. 5 Variation of autocorrelation PSLD and cross-correlation PSLD in composite Logistic sequence. (a) Difference between autocorrelated PSLD and sum of cross-correlated PSLDs; (b) distribution of sum of cross-correlated PSLDs

表 3 不同阵列规模下的归一化 PSLD 分布
Table 3 Normalized PSLD distribution under different array sizes

Sequence type	Quantity of sequences S	Difference between maximum and minimum autocorrelation PSLD d	Mean value of cross-correlation PSLD μ
Improved Logistic sequence	10	2.6×10^{-3}	9.3534×10^{-4}
	50	5.6×10^{-3}	8.4719×10^{-4}
	100	5.6×10^{-3}	8.6157×10^{-4}
	200	5.6×10^{-3}	8.5650×10^{-4}
Cascaded Logistic sequence	10	4.9×10^{-3}	9.4681×10^{-4}
	50	4.9×10^{-3}	8.6456×10^{-4}
	100	5.1×10^{-3}	8.5553×10^{-4}
	200	6.2×10^{-3}	8.5583×10^{-4}
Composite Logistic sequence	10	4.2×10^{-3}	10.0000×10^{-4}
	50	6.5×10^{-3}	9.0926×10^{-4}
	100	9.1×10^{-3}	9.1483×10^{-4}
	200	9.6×10^{-3}	9.1799×10^{-4}

从表 3 中可以看到,3 种序列的互相关 PSLD 的分布水平都相当稳定,其自相关 PSLD 的变化范围要远高于互相关 PSLD 均值。对于抗干扰能力来说,更重要的是确保较优的自相关性。当 SPAD 阵列规模不大时,可以将互相关 PSLD 设定为一个固定值,再扩大序列选择范围寻找比其自相关 PSLD 更大的编码序列。此时,可以将选择依据函数 $\lambda(i)$ 简化为

$$\lambda(i) = D_{\text{auto}}(i) - \mu(S - 1), \quad (14)$$

式中: μ 表示设定的互相关 PSLD 值。对于相同码长的混沌序列,只需要根据阵列规模 S 测试其自相关 PSLD 是否满足 $\lambda(i) > 0$ 即可。

3.3 编码方法及实现流程

虽然阵列间互相关 PSLD 的均值较为稳定,但从图 5 所示的测试结果来看,不同序列的互相关 PSLD 依然存在一定的波动。对于简化的方法来说,阵列规模理论上不宜超过 $1/\mu$ 。为达到更高的抗干扰标准,仍然需要通过遍历测试来寻找能够容纳更多阵元数量的初值形成探测所需的序列。由于混沌序列的初值敏感性较强,可以寻找到有限数量的满足阵列抗干扰要求的编码序列。为克服编码速率与抗互扰质量之间的矛盾,可以将编码对阵元采取一一对应的方式进行固定,后续探测只需要在生成的编码库中直接选取即可。对于规模为 S 的阵列,其编码过程的主要步骤如下:

① 选择合适的初值,生成 P ($P \gg S$) 个满足编码长度要求的序列,在其中寻找自相关 PSLD 最高的 s_1 作为阵元 E_1 的编码。

② 按照阵列的 PSLD 要求,生成可选序列的集合 $\{s_2, s_3, \dots, s_P\}$ 。

③ 在集合中选择自相关性较好的序列作为阵元 E_2 的编码,并将剩余序列与该序列进行相关性测试,按照 PSLD 要求去除数量为 Q 的不可用序列。

④ 当 $P - Q > S$ 时,继续重复步骤③,直至完成

全部 S 个阵元的编码。

⑤ 当 $P - Q \leq S$ 时,选择合适的初值生成 p 个混沌序列。通过与已经确定的阵元编码序列进行相关性测试,筛选出符合这些阵列 PSLD 要求的 q 个序列,将其补充至可选序列集合中,返回步骤③。

经过以上步骤,阵列中所有阵元的编码序列均符合整个阵列的 PSLD 要求,满足了大规模阵列的应用要求。

事实上,本文对编码相关性干扰的要求是比较极端的,阵列在短暂的探测间隙内同时接收到所有阵元对应的接收信号的概率较低,选中的混沌编码序列可以根据实际应用场景扩展到更大规模的阵列中。

4 结 论

为解决探测激光脉冲的高重复频率特征导致的距离模糊的问题,需要对探测脉冲进行随机编码。 m 序列、真随机序列等均不能满足大规模 SPAD 阵列的探测需求。由于混沌序列具有干扰特性强、生成效率高、编码格式灵活的特性,改进型 Logistic 序列具有较优的随机性质,本文对它们的适用性进行了重点研究。针对单级混沌系统存在的动力学退化问题,通过对序列的 Lyapunov 指数进行分析,提出了基于混沌级联的复合型 Logistic 编码优化方案。由于阵列中的不同阵元之间在编码互扰,需要确保阵元编码的自相关结果远大于其他编码互相关的影响,为此,本文提出了峰值旁瓣差这一阵列探测能力的评价标准。通过仿真测试多个序列的互相关峰值旁瓣差变化,提出了基于峰值旁瓣差选择可应用编码序列的快速处理方法。最后给出了大规模 SPAD 阵列的具体编码方法。所用编码经过了峰值旁瓣差的筛选,各阵元可以使用相对固定的编码序列,因此所提方案在工程实现上具有较大优势。下一步,本团队将重点结合实际探测需求设计合

适的混沌级联方式,并继续探索更优的随机编码方案。

参 考 文 献

- [1] 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达的研究进展[J]. 中国激光, 49(19): 1910003.
Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Review of advances in single-photon LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 49(19): 1910003.
- [2] 吴兴国, 羊毅, 郝培育. 消除距离模糊的扩展伪随机码调制激光测距技术[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0408001.
Wu X G, Yang Y, Hao P Y. Unambiguous laser ranging technology based on extended pseudo random modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0408001.
- [3] Liu B, Yu Y, Chen Z, et al. True random coded photon counting Lidar[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(2): 190044.
- [4] Xu H, Wang B J, Han H, et al. Remote imaging radar with ultra-wideband chaotic signals over fiber links[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2015, 25(11): 1530029.
- [5] 高华政, 冯雨燕, 虞名海, 等. 数字混沌抗干扰激光雷达设计[J]. 光通信研究, 2021(3): 6-10.
Gao H Z, Feng L Y, Yu M H, et al. Design of digital chaos anti-jamming lidar[J]. Study on Optical Communications, 2021(3): 6-10.
- [6] 张天舒, 王冰洁, 徐航, 等. 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[J]. 半导体光电, 2021, 42(3): 424-429.
Zhang T S, Wang B J, Xu H, et al. Mutual interference suppression of chaotic imaging lidar for automotive application[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 424-429.
- [7] Feng L Y, Gao H Z, Zhang J X, et al. FPGA-based digital chaotic anti-interference lidar system[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 719-728.
- [8] 张民, 李宗浩, 高明. 基于 Lorenz 混沌的 MIMO 雷达信号设计及性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 58-64.
Zhang M, Li Z H, Gao M. Design and performance of MIMO radar signal based on Lorenz chaos[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(1): 58-64.
- [9] 陈松懋. 单光子探测编码技术及图像重构算法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
Chen S M. Research on coding technique and image reconstruction algorithm based on single photon detection[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [10] Zhang Y F, 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.
- [11] 沈姗姗, 陈钱, 何伟基, 等. 基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1012001.
Shen S S, Chen Q, He W J, et al. Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1012001.
- [12] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2015, 1(2): 112-125.
- [13] 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0614003.
Yang F, Zhang X, He Y, et al. Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0614003.
- [14] 迟进祥. 伪随机码调制的光子计数激光雷达测距系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
Chi J Z. Research on photon counting lidar ranging system based on pseudo random code modulation[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [15] 李玉珍. 基于混沌的扩频序列通信系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
Li Y Z. Spread spectrum communication system research based on chaotic sequence[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [16] Li B, Deng G W, Zhang R M, et al. High dynamic range externally time-gated photon counting optical time-domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(23): 5899-5906.
- [17] 易称福, 陈宇环, 蔡炳煌. 四种常见数字混沌扩频序列的特性分析[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学与医学版), 2008, 29(4): 72-80.
Yi C F, Chen Y H, Cai B H. Property analysis of four kinds of usual digital chaotic spread-spectrum sequences[J]. Journal of the Graduates Sun Yatsen University(Natural Sciences & Medicine), 2008, 29(4): 72-80.
- [18] 刘彤, 郭晓敏, 张浩杰, 等. 混沌激光光子互相关的分析与测量[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2414002.
Liu T, Guo X M, Zhang H J, et al. Analysis and measurement of photon cross-correlation of chaotic laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2414002.
- [19] Wang S H, Liu W R, Lu H P, et al. Periodicity of chaotic trajectories in realizations of finite computer precisions and its implication in chaos communications[J]. International Journal of Modern Physics B, 2004, 18: 2617-2622.
- [20] 艾名舜, 马红光, 王令欢. 混沌二相编码的雷达脉冲压缩信号[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(1): 26-29, 37.
Ai M S, Ma H G, Wang L H. Chaotic binary-phase coded radar pulse compression signal[J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(1): 26-29, 37.
- [21] 王光义, 袁方. 级联混沌及其动力学特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 020506.
Wang G Y, Yuan F. Cascade chaos and its dynamic characteristics [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 020506.

Coding Based on Large-Scale SPAD Array Ranging Application

Pan Qingyu, Wang Chao*, Ren Jiawei, Wang Dapeng, Zhu Yijun

Information Systems Engineering College of PLA Strategic Support Force Information Engineering University,
Zhengzhou 450000, Henan, China

Abstract

Objective Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) array detectors are commonly used for the ranging and three-dimensional imaging of long-range targets in space. In the application of detection with SPAD devices, the detection system generally selects a high-repetition-frequency detection system to obtain photon data quickly. Currently, random sequence coding is primarily used to suppress the range ambiguity effect caused by a high repetition frequency. To meet the requirements of fast target detection under the conditions of a long distance and large field of view, more complete target information must be obtained through multiple parallel

SPAD detection pixels. For an SPAD array with a large array structure, any photon signal reaching the receiver surface can cause an equivalent photocurrent response. The return signal received by a certain element may originate from several different transmission signals, which may affect the array detection results. To effectively distinguish the array pixels at the receiver, the coding waveforms in each period should not interfere with each other, and numerous random coding sequences are required to be orthogonal to each other. Because of factors, such as waveform duration and hardware system accuracy, the coding sequences in the actual system have a certain degree of correlation. In addition, the optical signal is non-negative, and the power is only superimposed but not offset. The cross-correlation responses among the array elements accumulate, which interferes with the identification of correlation peaks, resulting in false detection alarms and result misjudgment. Therefore, identifying a random sequence with a strong anti-interference ability to encode an SPAD array is required for highly accurate detection.

Methods The basic principle of using random coding to solve the range ambiguity problem in a single-photon detection system is introduced, and the coding structure and correlation characteristics of pseudo-random, true random, and chaotic sequences are compared and analyzed. Owing to the fixed coding length and form, pseudo-random sequences represented by m -sequences cannot generate codes of a given length according to the design requirements, and even longer coding sequences might need to be chosen. A long coding sequence inevitably leads to long encoding processing and receiving times, which has a significant impact on the delay in array detection. Although the true random sequence has a strong anti-crosstalk ability, its unpredictable and unrepeatable characteristics require a high-quality physical entropy source, which is limited in this application scenario. Chaotic sequences exhibit strong random and anti-interference characteristics. Their length is not limited by a fixed format and can be adjusted according to the greatest distance from the target, which can better meet the coding requirements of large-scale SPAD array detection. Through the simulation and analysis of the coding structure and correlation of various chaotic sequences, the application advantages of the improved logistic coding in large-scale spatiotemporal arrays were verified. Given the possible dynamic degradation of single-stage chaotic sequences, a compound logistic sequence is designed as the encoding method for the space-time array according to the range change of the Lyapunov exponent. In array-coded detection, the autocorrelation of sequences is an important index that affects the detection ability of a single array element, and the cross-correlation reflects the interference intensity between different detection elements. The Peak Side Lobe Ratio (PSLR) is typically used as an index to evaluate coding correlations within an array. However, the PSLR cannot be used to quantitatively compare the effect of cross-correlation accumulation on autocorrelation results in arrays. To quantify the effect of cross-correlation accumulation on the recognition of autocorrelation peaks in arrays, we established the concept of Peak Side-Lobe Difference (PSLD) to represent the normalized difference between the correlation peak and the maximum side-lobe value.

Results and Discussions For encoding requirements of large-scale arrays, we set up a selection basis function based on PSLD, and use this function to filter the generated chaotic sequences to ensure that they can meet the anti-interference requirements of the desired array size. Because of the tediousness of calculating cross-correlations between arrays, a fast method for selecting available encoding sequences is provided by simulating and testing the changes in the autocorrelation PSLD and cross-correlation PSLD for multiple sets of sequences. Combined with the application requirements for long-range detection, a specific flow of large-scale SPAD array coding is provided. In order to meet the detection requirements of larger arrays, combined with the application requirements of long-range detection, the specific process of large-scale SPAD array encoding using traversal testing method is given. The codes used are filtered by PSLD, and each element can use a relatively fixed coding sequence, which makes the proposed scheme more advantageous in engineering implementation.

Conclusions In order to meet the encoding requirements of large-scale SPAD arrays, through the comparative analysis of the number of encoding, generation efficiency, format length, correlation properties of various random sequences, this paper points out the advantages of improved Logistic encoding in large-scale SPAD arrays. Based on the variation of Lyapunov index range, a composite Logistic sequence is designed as the encoding method of large-scale SPAD arrays. At the same time, considering the requirement of no interference between the elements, the suitable relationship between the generated sequence and the size of the array and the optimal selection scheme are given. Next, we will focus on the design of appropriate chaos cascade based on the actual detection needs, and continue to explore better random coding schemes.

Key words detectors; SPAD array; chaotic sequence; peak side-lobe difference; cascaded coding