

引用格式: 张傲, 何在民, 广伟, 等. 多指标约束的伪随机序列优选方法[J]. 时间频率学报, 2025, 48(4): 329-338.

## 多指标约束的伪随机序列优选方法

张傲<sup>1</sup>, 何在民<sup>1,2,†</sup>, 广伟<sup>1,2</sup>, 张池<sup>1</sup>, 夏婷<sup>1</sup>, 邓雪<sup>1,2</sup>, 薛文祥<sup>1,2</sup>

1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院 西安 710121;
2. 陕西省信息通信网络及安全重点实验室 西安 710121

**摘要:** 直接序列扩频 (DSSS) 通过将数据与伪随机序列进行调制, 从而实现数据频谱的扩展。伪随机序列性能影响系统的抗干扰能力、用户容量、同步速度、误码率及安全性, 是通信与导航系统设计的核心要素之一。针对伪随机序列的平衡性、随机性、复杂度以及自/互相关性等核心指标, 提出以双极性累加、扑克检验与 Lempel-Ziv 复杂度为约束的伪随机序列优选方法, 并以自/互相关旁瓣峰值与均方根值为准则判断序列相关性能的优劣。通过 Gold 序列和 Weil 序列验证了所提优选方法的有效性, 为伪随机序列的优选提供一种新的途径。

**关键词:** 伪随机序列; 双极性累加; 扑克检测; Lempel-Ziv 复杂度; 相关旁瓣峰值

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-04-0329-10

## Optimization method of pseudo random sequence with multi index constraints

ZHANG Ao<sup>1</sup>, HE Zai-min<sup>1,2,†</sup>, GUANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>,  
XIA Ting<sup>1</sup>, DENG Xue<sup>1,2</sup>, XUE Wen-xiang<sup>1,2</sup>

1. School of Communications and Information Engineering,  
Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an 710121, China

**Abstract:** Direct sequence spread spectrum (DSSS) modulates data with pseudo-random sequences to achieve data spectrum expansion. The performance of pseudo-random sequence affects the anti-interference ability, user capacity, synchronization speed, bit error rate and security of the system, which is one of the core elements of communication and navigation system design. Aiming at the core indexes of pseudo-random sequences, such as balance, randomness, complexity and self/cross-correlation, an optimization method of pseudo-random sequences is proposed, which is constrained by bipolar accumulation, poker test and Lempel Ziv complexity. The correlation performance of sequences is judged by the peak value of auto/cross-correlation sidelobe and root mean square (RMS) value. The effectiveness of the proposed optimization method is verified by Gold sequence and Weil sequence, which provides a new way for the optimization of pseudo-random sequences.

**Keywords:** pseudo random sequence; bipolar accumulation; poker test; Lempel-Ziv algorithm; related sidelobe peak

随着现代数字技术的发展,通信技术在保密性、可靠性和抗干扰性等方面取得了显著进展。直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)具有频谱宽、功率谱密度低及抗干扰能力强等诸多优势,使其能够在低信噪比条件下稳定工作<sup>[1]</sup>,在现代军民通信领域得到广泛应用。DSSS 系统调制原理就是利用高速伪随机序列与低速数据码进行模二加运算后实现对数据码的扩频<sup>[2]</sup>,因此伪随机序列对通信系统的性能有着决定性的影响。在卫星导航领域,伪随机序列不仅能够区分不同的卫星信号,而且在测距过程中其性能的优劣直接影响定位精度<sup>[3]</sup>;在移动通信领域,利用伪随机序列能够进行信道估计,其良好的自/互相关性可以减小信号间的干扰<sup>[4]</sup>。因此,针对伪随机序列的研究具有重要意义。

为保证扩频通信的保密性和抗干扰能力,通常选择随机性与复杂度较高、平衡性好的伪随机序列作为扩频序列,对此需要采用适当的方法搜索序列族中随机程度和复杂度高的平衡序列。针对伪随机序列的优选,文献[5]采用减小序列异步时序列代数和互相关峰值干扰的角度出发,优选出具有较小代数和互相关峰值的 Gold 序列;文献[6]主要针对序列的平衡性,提出一种基于约束条件结合特征相位求取平衡 Gold 序列的方法;文献[7]针对混沌序列,通过对其初值和分形参数进行相互控制和异或叠加,并选取合适的初值和分形参数的方式,提出新的复合混沌优选序列。

而目前伪随机序列优选方法的研究存在明显局限性:一方面,多数方法仅适用于特定类型的伪随机序列;另一方面,现有优选标准往往仅考虑单一性能指标,而缺乏兼顾多指标性能、具有广泛适用性的综合优选方法。因此本文以平衡性、随机性和复杂度为优选目标,设计了一种基于双极性累加、扑克检测和 Lempel-Ziv 复杂度相结合的多指标约束伪随机序列优选方法,然后以 Gold 序列和 Weil 序列的优选作为验证,从 Gold 序列初相值和构成 Weil 序列的 Legendre 序列相位差两个角度出发,搜索能够产生随机程度和复杂度高的平衡 Gold 序列初相值和 Legendre 序列相位差,并对其自/互

相关性进行验证,实现伪随机序列的优选。

## 1 核心指标计算方法

平衡性、随机性、复杂度和自/互相关特性是伪随机序列的核心性能指标。

序列的平衡性是指在一个周期中,码元 1 的数目和码元 0 的数目相差 1 或数目相等的伪随机序列称为平衡序列,否则为非平衡序列<sup>[8]</sup>。伪随机序列的平衡性对通信系统的质量有着很大影响。在 DSSS 系统中,平衡序列相较于非平衡序列有着更大的载波抑制能力<sup>[9]</sup>。

序列的随机性和复杂度是评估伪随机序列安全性的重要指标<sup>[10]</sup>。强随机性保证了序列的不可预测性,从而增强了系统对统计分析攻击和暴力破解的抵抗力;而高复杂度能够有效提升序列的抗压缩性和抗模式识别能力。具备强随机性和高复杂度的伪随机序列可以确保扩频信号在传输过程中有效抵抗外部干扰或恶意预测<sup>[11]</sup>,从而显著增强通信系统的抗干扰能力、抗侦察能力以及整体安全性。

序列的自/互相关性是衡量序列与自身在不同时间延迟下的相似度以及不同序列之间的相似度。高自相关和低互相关的序列不仅可以增强通信系统的抗干扰能力和信号同步性,同时能够优化频谱利用率,提升系统容量和效率<sup>[12]</sup>。

针对伪随机序列的平衡性、随机性、复杂度和自/互相关特性,分别可采用双极性累加值、扑克检测、Lempel-Ziv 复杂度以及自/互相关性旁瓣峰值与均方根(root mean square, RMS)值来进行表征。

### 1.1 双极性累加值

设伪随机序列  $S$  的长度为  $n$ , 首先将二进制序列进行双极性转换,将序列中的 1 变为 -1, 0 变为 1, 如式(1)所示:

$$S_{\text{Bipo}} = 1 - 2 \cdot S \quad (1)$$

然后对转换后的双极性序列  $S_{\text{Bipo}}$  进行累加。

当序列长度  $n$  为奇数时,在平衡性较好的情况下,序列中 1 的个数比 0 的个数多一个,因此经双极性转换后若  $S_{\text{Bipo}}$  序列累加和为 -1, 则证明序列为

平衡序列；如果序列长度为偶数，若  $S_{\text{Bipo}}$  序列累加和为 0，则证明序列中 1 和 0 数目相等，为平衡序列，否则累加结果绝对值越大，平衡性越差。

此种方式仅通过求和操作即可实现序列平衡性检测，可有效减少平衡序列搜索的运算复杂度。

### 1.2 扑克检测

扑克检测 (poker test) 是密码学中一种常用的随机性检测方法，通常用于评估伪随机数或伪随机序列的随机性。该方法通过分析随机序列中长度为  $m$  的  $2^m$  类非重叠子序列出现概率来判断其是否符合均匀分布<sup>[13]</sup>，从而评估序列的随机质量。

根据国家密码局发布的随机性检测规范 GM/T 0005—2021 文件，扑克检测分为以下四个步骤<sup>[14]</sup>。

步骤 1: 将长度为  $n$  的待检测序列划分成  $N$  个长度为  $m$  的非重叠子序列， $N$  向下取整，舍弃多余比特。用  $n_i$  表示统计的第  $i$  类子序列出现次数， $1 \leq n_i \leq 2^m$ 。

步骤 2: 计算统计值  $V$ ：

$$V = \sum_{i=1}^{2^m} \frac{(n_i - \frac{N}{2^m})^2}{\frac{N}{2^m}} \quad (2)$$

式 (2) 中， $V$  应服从自由度为  $2^m - 1$  的  $\chi^2$  分布。

步骤 3: 计算随机性度量指标  $P$  值：

$$P_{\text{valu}} = \text{igamc}(\frac{2^m - 1}{2}, \frac{V}{2}) \quad (3)$$

式 (3) 中的  $\text{igamc}$  是不完全伽马函数，该函数的数学表达式为：

$$\begin{cases} \text{igamc}(\alpha, \beta) = \frac{\int_{\beta}^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt}{\int_0^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt} \\ \alpha > 0, \beta > 0 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 4: 结果判定。将计算出的  $P$  值与显著性水平阈值  $\alpha$  (根据文献[14]，一般取值为 0.01) 进行比较，若  $P_{\text{valu}} \geq \alpha$ ，则认为序列随机性良好，通过扑克检测，否则未通过检测。

扑克检测作为一种卡方统计检测方法，为序列的随机程度提供了直观的量化指标，是一种高效且广泛使用的随机性评估方法。

### 1.3 Lempel-Ziv 复杂度

为了能够描述时间序列中发现新模式的速率，Lempel 和 Ziv 设计了全新的 Lempel-Ziv 复杂度算法<sup>[15]</sup>。Lempel-Ziv 复杂度衡量的是随着数据序列长度的增加，序列中出现新模式的频率，其值越高，说明序列的复杂度越大<sup>[16]</sup>。

在计算 Lempel-Ziv 复杂度之前，任意非二值数据集  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$  均需采用以序列均值为分界点的二值粗粒化方法转换成二进制 0-1 序列，粗粒化过程如图 1 所示。

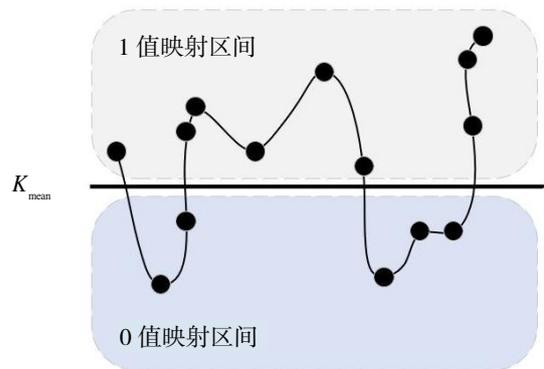


图 1 二值粗粒化过程

Lempel-Ziv 算法计算序列复杂度流程如下。

1) 初始化复杂度值  $C(0) = 0$ ，针对数据集  $K$ ，设置阈值  $T_h$ ：

$$T_h = \sum_{i=1}^N k_i / N \quad (5)$$

2) 对  $K$  进行二值粗粒化：

$$K_B = \begin{cases} k_B\{i\} = 1, & k\{i\} \geq T_h \\ k_B\{i\} = 0, & k\{i\} < T_h \end{cases} \quad (6)$$

3) 首先设  $B_{L,0} = \{ \}$ ， $Q_0 = \{ \}$ ， $s = 1$ ，令  $Q_s = \{Q_{s-1} B_s\}$ ， $B_{L,s-1} = \{B_{L,s-2} B_{s-1}\}$ ，判断  $Q_s$  是否属于  $B_{L,s-1}$ 。若属于，则  $C(s) = C(s-1)$ ， $s = s + 1$ ；若不属于，那么  $C(s) = C(s-1) + 1$ ， $Q_s = \{ \}$ ， $s = s + 1$ 。重复此步骤，直到全部序列值遍历完毕。最后  $C(N)$  所得值即为数据集  $K$  的 Lempel-Ziv 复杂度。

为了不依赖于序列长度的影响，Lempel-Ziv 复杂度归一化度量公式如下<sup>[17]</sup>：

$$\begin{cases} 0 \leq C_{nz}(N) = \frac{C(N)}{C_{UL}(N)} \leq 1 \\ C_{UL}(N) \approx \frac{N}{\log_2 N} \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, Lempel-Ziv 归一化复杂度通常处于 0~1 范围内, 序列复杂性越好, 归一化复杂度值越接近 1。然而根据文献[18]的相关研究可知, 在实际应用中由于序列长度的影响, 复杂度优异的序列其  $C_{nz}$  值要略大于 1。

#### 1.4 自/互相关性旁瓣峰值与均方根值

为了准确描述序列相关性能的优劣, 在分析序列自/互相关性时可以根据序列的自相关旁瓣峰值、自相关旁瓣 RMS 值、互相关峰值以及互相关 RMS 值进行综合评价<sup>[19]</sup>。

伪随机序列的归一化自相关函数定义为

$$R_{ac}(m) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+m} / N & m \in (0, N] \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_i / N & m = 0 \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_{i-m} x_i / N & m \in [N-1, 0) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,  $x$  为双极性伪随机序列,  $N$  为序列长度,  $m$  为相对相位偏移量。

自相关旁瓣峰值为:

$$\begin{cases} R_{acsp} = \max |R_{ac}(m)| \\ m \in [-N+1, 0) \cup (0, N-1] \end{cases} \quad (9)$$

自相关旁瓣 RMS 为:

$$\begin{cases} \sigma_{acs} = \sqrt{\sum (R_{ac}(m))^2 / (2N-1)} \\ m \in [-N+1, 0) \cup (0, N-1] \end{cases} \quad (10)$$

而伪随机序列的归一化互相关函数定义为:

$$R_{cc}(m) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_{i+m} / N & m \in (0, N] \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i / N & m = 0 \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_{i-m} y_i / N & m \in [N-1, 0) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中,  $y$  表示和  $x$  同族的伪随机序列。

互相关旁瓣峰值为:

$$\begin{cases} R_{ccsp} = \max |R_{cc}(m)| \\ m \in [-N+1, 0) \cup (0, N-1] \end{cases} \quad (12)$$

互相关旁瓣 RMS 为:

$$\begin{cases} \sigma_{ccs} = \sqrt{\sum (R_{cc}(m))^2 / (2N-1)} \\ m \in [-N+1, 0) \cup (0, N-1] \end{cases} \quad (13)$$

在上述指标中, 自相关旁瓣峰值和 RMS 值、互相关峰值和 RMS 值越小, 说明伪随机序列性能越好, 反之伪随机序列性能越差。

## 2 多指标约束的优选方法

为满足高质量伪随机序列的生成要求, 设计了一种基于多指标约束的优选方法。优选方法流程如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 该方法通过双极性累加、扑克检测和 Lempel-Ziv 复杂度三重检测机制, 确保所选序列在平衡性、随机性和复杂度等核心性能指标上均达到最优, 搜索过程中关键步骤如下。

① 在优选搜索开始之前, 必须对伪随机序列生成所需的关键参数进行严格检测, 以确保满足序列生成条件, 保证后续搜索过程的可靠性和准确性。

② 在平衡性检测模块中, 根据 1.1 节奇/偶长度序列的平衡性特性, 对生成的伪随机序列首先进行双极性累加操作来验证其平衡性, 减少程序搜索的运算复杂度。若双极性累加和结果不满足 1.1 中的要求, 则程序将跳出当前搜索过程, 并更新搜索参数, 进行下一轮搜索验证。

③ 在随机性检测模块中, 如 1.2 节所述, 显著性水平  $\alpha$  通常取值为 0.01。本设计为筛选结果的严谨性, 将  $\alpha$  值提高为 0.05。此外扑克检测的子序列长度  $m$  的取值需要综合考虑。较小的  $m$  值可能使得扑克检测更容易出现假阳性(即误判序列为非随机)。由于每个子块的比特数量较少, 可能会有较大的偶然波动, 导致统计量的分布偏离理论预期, 从而错误地拒绝序列是随机的假设; 而较大的  $m$  值减少了每个子块的偶然波动, 能够更稳定地估计序列的统计特性, 但会增加假阴性风险(即误判序列为随机), 特别是在序列中的某些小规模规律性或偏差难以在大的块内显现出来。

④ 在复杂度检测模块中，采用 Lempel-Ziv 算法计算序列复杂度，并通过式 (7) 对复杂度进行归一化处理。由于在实际计算中，具有优异复杂特

性的二值序列其 Lempel-Ziv 归一化复杂度值通常略大于 1，因此为确保能够筛选出高复杂度序列，故将评判阈值  $C_{th}$  设为 1。

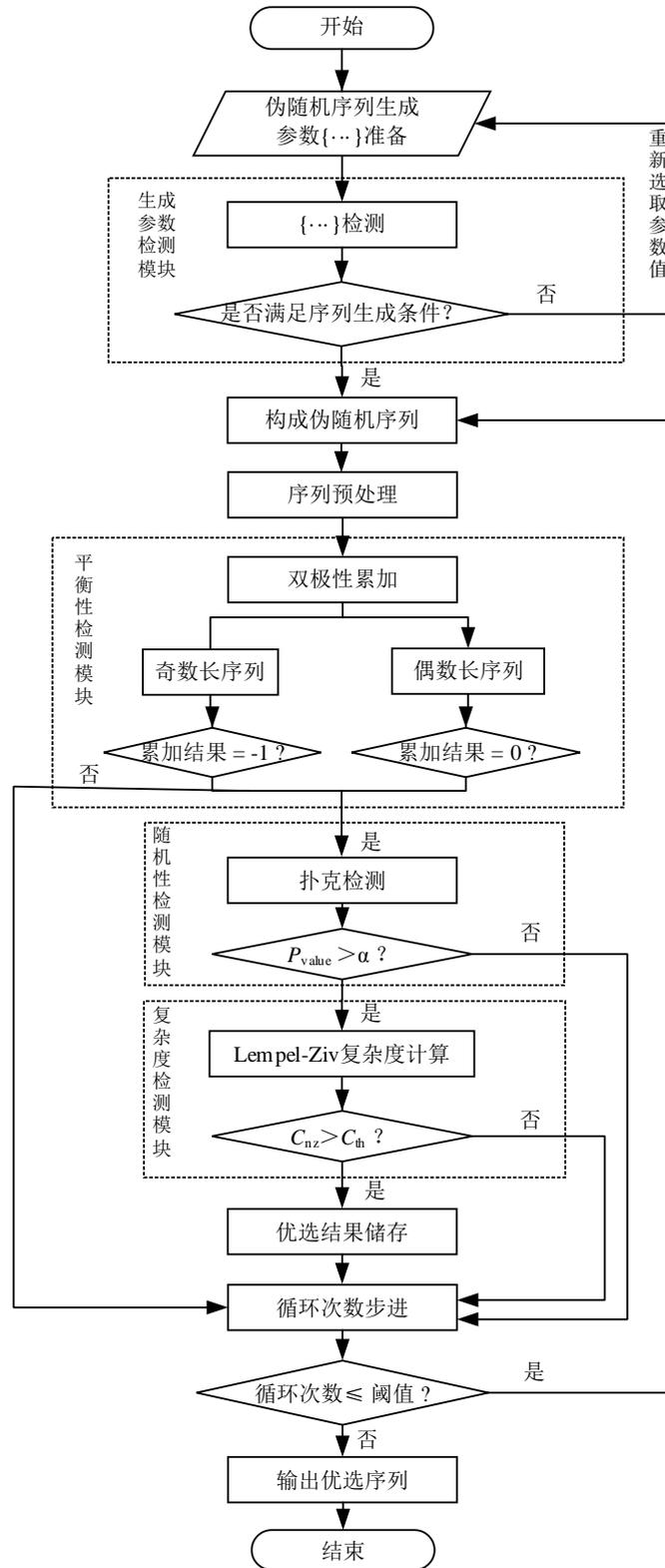


图 2 伪随机序列优选搜索流程图

### 3 优选方法验证与分析

以 Gold 序列和 Weil 序列的优选为例, 利用所提方法分别对这两种序列进行优选并计算优选序列的自/互相关指标, 验证所提优选方法的有效性。

在 Gold 序列的优选设计中, 给定初相值  $g_1$  和本原多项式  $G_1G_2$ , 搜索能够产生优选 Gold 序列的初相值  $g_2$ ; 在 Weil 序列的优选设计中给定 Legendre 序列长度  $N$ 、截断 Weil 序列长度  $N_{\text{weil}}$  和相位截取

点  $p$ , 搜索能够产生优选 Weil 序列的 Legendre 序列相位差  $w$ 。为保证优选序列的强随机性和高复杂度, 令扑克检测的显著性水平阈值  $\alpha = 0.05$ , Lempel-Ziv 归一化复杂度阈值  $C_{\text{th}} = 1$ 。

#### 3.1 序列长度为奇数

优选 Gold 序列和优选 Weil 序列程序的先前输入参数如表 1 所示。其中  $F_s$  为伪随机序列频率,  $T_c$  为序列周期,  $n$  为 Gold 序列级数。

表 1 Gold 与 Weil 序列参数值

	Gold 序列	Weil 序列
$F_s$	1.023 MHz	
$T_c$	1 ms	
$n$	10	
$g_1$	[0000000001]	
$G_1$	$1+x+x^4+x^5+x^6+x^7+x^{10}$	无
$G_2$	$1+x^2+x^5+x^6+x^7+x^8$	
$N$		10 211
$p$	无	9 189
$w$		1

根据序列长度, 设定扑克检测子序列长度  $m=4$ , 经程序搜索的部分 Gold 序列初相值  $g_2$  和 Weil 序列的相位偏移量  $w$  如表 2 所示。

从表 2 中选取前五组进行平衡性和随机性, 以及自相关和互相关特性的验证。其相关结果如图 3 所示, 相关参数值及 RMS 详见表 3。

表 2 奇数长 Gold 序列和 Weil 序列优选结果 (部分)

序号	Gold 序列		Weil 序列
	初相值 $g_1$	初相值 $g_2$	相位差 $w$
1	[0000000001]	[0000101010]	28
2	[0000000001]	[0010100100]	57
3	[0000000001]	[0101001111]	86
4	[0000000001]	[1000001001]	153
5	[0000000001]	[1000011011]	255
6	[0000000001]	[1010011000]	294
7	[0000000001]	[1110100100]	302

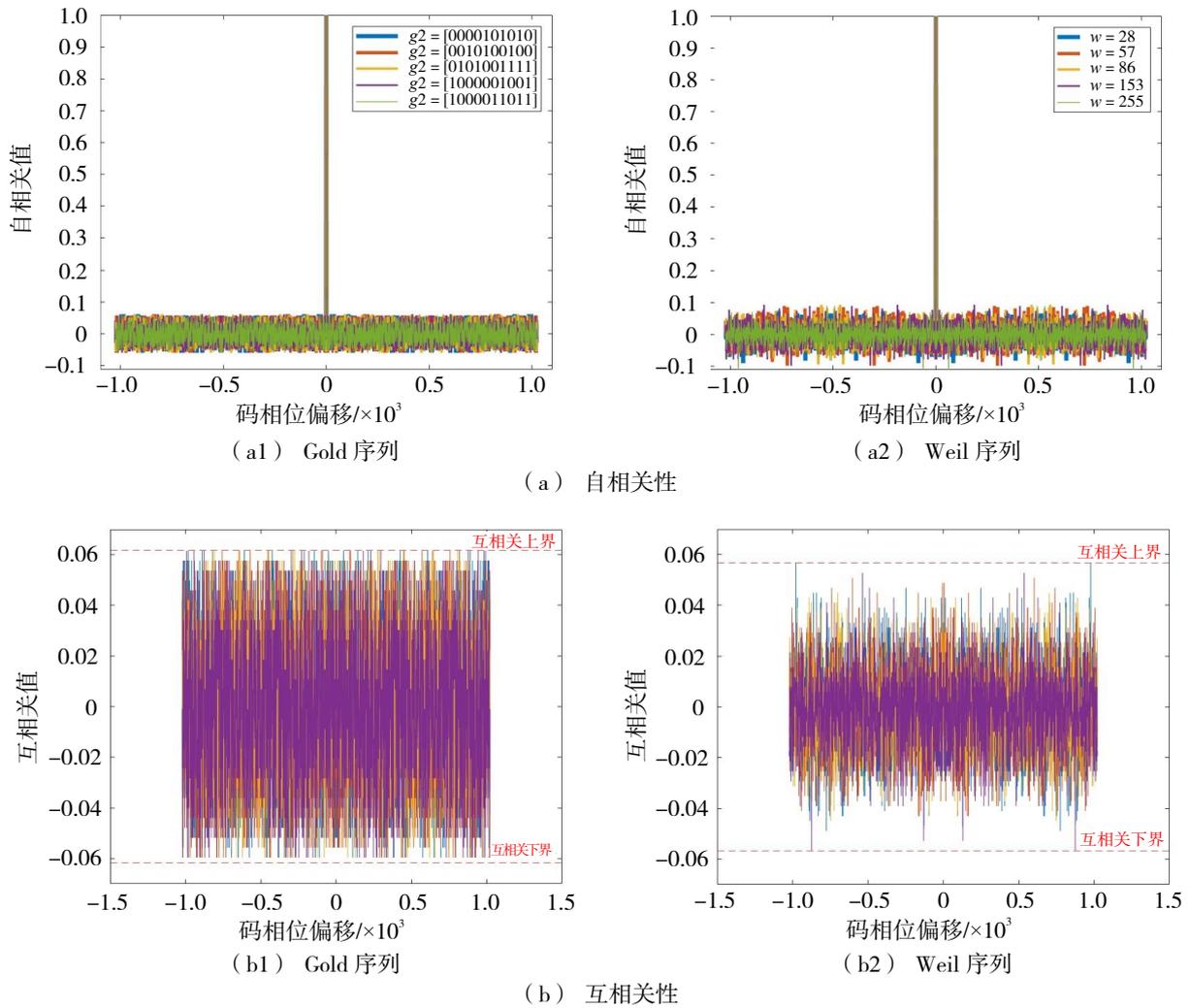


图 3 奇数长优选序列相关性

表 3 奇数长优选序列相关参数

序列类型	初相 $g_1$	初相 $g_2$	相位差 $w$	双极性累加	扑克检测 $P$ 值	Lempel-Ziv 复杂度	自相关旁瓣峰值/RMS 值	互相关旁瓣峰值/RMS 值
Gold 序列	[00000 00001]	[00001 01010]	-1	-1	0.632 6	1.055 6	0.0615 8/0.031 4	互相关基准序列
		[00101 00100]	-1	-1	0.844 3	1.045 8	0.0615 8/0.032 0	0.0615 8/0.031 2
		[01010 01111]	无	-1	0.407 8	1.075 1	0.0615 8/0.031 6	0.0615 8/0.031 2
		[10000 01001]	-1	-1	0.629 9	1.055 6	0.0615 8/0.031 2	0.0615 8/0.031 2
		[10000 11011]	-1	-1	0.124 8	1.055 6	0.0615 8/0.031 3	0.0615 8/0.031 2
Weil 序列	无	无	28	-1	0.661 4	1.055 6	0.090 9/0.028 2	互相关基准序列
			57	-1	0.555 2	1.084 9	0.098 7/0.031 2	0.056 7/0.016 5
			86	-1	0.593 8	1.065 3	0.094 8/0.032 3	0.050 8/0.016 1
			153	-1	0.207 8	1.045 8	0.098 7/0.032 2	0.045 0/0.015 6
			255	-1	0.745 3	1.036 0	0.133 9/0.028 7	0.056 7/0.015 8

由图 3 和表 3 可以看出，在对奇数长度伪随机序列的分析中，所选择验证的 Gold 序列和 Weil 序列具有尖锐的自相关性，自相关函数在相位 0 偏移处

产生了显著的相关峰值；同时序列的自相关函数旁瓣值和互相关函数值的 RMS 较低，自/互相关性能优异。且两类序列双极性累加结果均为-1，扑克检

测的  $P$  值均大于显著性水平  $\alpha$ ，Lempel-Ziv 算法计算的序列复杂度均大于 1，在平衡性、随机性和复杂度这三种核心指标上均达到最优值，满足优选要求。

### 3.2 序列长度为偶数

令  $F_s = 1 \text{ MHz}$ ， $T_c = 1 \text{ ms}$ ， $p = 9\ 237$ ，产生码

长为 1 000 的截断 Gold 序列和 Weil 序列，其余条件不变。则经程序搜索的部分结果如表 4 所示。

从表 4 中选取前五组进行平衡性、随机性、复杂度以及自相关和互相关特性的验证。其相关结果如图 4 所示，相关参数值及 RMS 详见表 5。

表 4 偶数长截断 Gold 序列和 Weil 序列优选结果（部分）

序号	截断 Gold 序列		Weil 序列
	初相值 $g_1$	初相值 $g_2$	相位差 $w$
1	[000000000 1]	[0000110100]	9
2	[000000000 1]	[0010000111]	48
3	[000000000 1]	[0101111101]	65
4	[000000000 1]	[0111010000]	72
5	[000000000 1]	[1001000010]	170
6	[000000000 1]	[1101101000]	241
7	[000000000 1]	[1110110001]	302

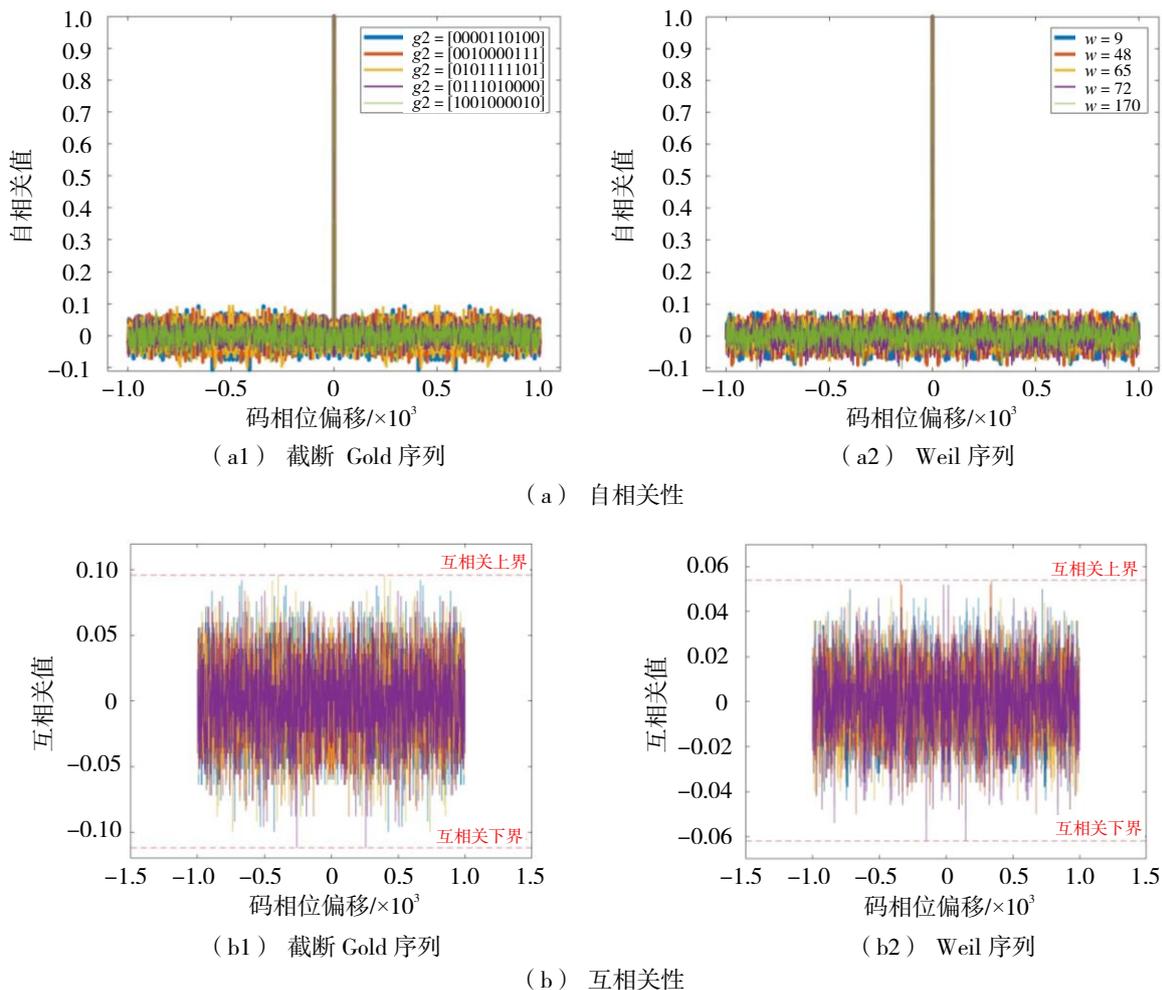


图 4 偶数长优选序列相关性

表 5 偶数长优选序列相关参数

序列类型	初相 g1	初相 g2	相位差 w	双极性累加	扑克检测 P 值	Lempel-Ziv 复杂度	自相关旁瓣峰值/RMS 值	互相关旁瓣峰值/RMS 值
截断 Gold 序列	[00000 00001]	[00001 10100]	无	0	0.549 9	1.006 5	0.108 0/0.033 3	互相关基准序列
		[00100 00111]		0	0.288 7	1.066 3	0.096 0/0.033 6	0.100 0/0.032 0
		[01011 11101]		0	0.926 9	1.076 3	0.104 0/0.035 8	0.088 0/0.031 1
		[01110 10000]		0	0.118 3	1.056 4	0.076 0/0.027 8	0.100 0/0.032 4
		[10010 00010]		0	0.753 2	1.106 2	0.084 0/0.030 3	0.112 0/0.031 4
Weil 序列	无		9	0	0.859 8	1.056 4	0.088 0/0.030 3	互相关基准序列
			48	0	0.054 3	1.086 3	0.092 0/0.030 5	0.050 0/0.015 7
			65	0	0.821 7	1.066 3	0.088 0/0.030 5	0.054 0/0.015 7
			72	0	0.129 6	1.036 4	0.096 0/0.032 2	0.048 0/0.015 5
			170	0	0.296 0	1.076 3	0.104 0/0.030 4	0.062 0/0.016 8

从图 4 和表 5 中可以看出，在针对偶数长度序列的分析中，所选择验证的截断 Gold 序列和 Weil 序列自相关函数零相位偏移处相较于其他相位偏移处同样具有强相关峰，自相关函数旁瓣值和互相关函数的 RMS 均处于较低水平，表现出优异的自/互相关性。且两类序列的双极性累加结果均为 0，扑克检测的 P 值和 Lempel-Ziv 复杂度同样满足优选要求。

上述验证结果与理论分析一致，验证了所提伪随机序列优选方法的正确性。

### 4 结语

在 DSSS 通信系统中，伪随机序列的优选能够有效增强数据传输的抗干扰能力、信号隐蔽性和传输质量，同时提高多用户系统的容量和解调同步精度。综合考虑伪随机序列的平衡性、复杂度及其自相关性和互相关性等关键因素，提出结合双极性累加、扑克检测和 Lempel-Ziv 算法的多指标约束伪随机序列优选方法，并以 Gold 序列和 Weil 序列优选为例，验证了该方法在伪随机序列优选中的有效性。优选结果验证表明，该优选方法能够在序列族中搜索出平衡性好、随机性强、复杂度高、自/互相关性能优异的序列，具有普遍适用性，为伪随机序列的优选提供了新思路。

### 参考文献：

- [1] OHS, MOON H. Novel algorithm for joint channel estimation and spreading sequence detection in DSSS systems[J]. IEEE Access, 2024(12): 128694-128701.
- [2] 兰胜坤. 基于 MATLAB 的直接序列扩频通信系统的仿真模型[J]. 信息系统工程, 2023, (10): 24-27.
- [3] 马旭辉, 荆文芳. 一种新扩频码的性能分析[J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 345-356.
- [4] 李宏年. 伪随机序列及其在现代移动通信中的应用[J]. 电声技术, 2021, 45(10): 120-122.
- [5] 刘明夺, 郭黎利, 姜晓斐. 并行组合扩频系统中 Gold 序列代数和相关性及优选[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(4): 33-38.
- [6] 宁宁, 刘欢. 平衡 Gold 序列求取方法的仿真研究[J]. 信息通信, 2013(9): 9-10.
- [7] 田明浩, 徐晓丹, 刘芳, 等. 基于扩频的复合混沌优选序列生成方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(5): 1-6.
- [8] MARCOVICH S, ETZION T, YAAKOBI E. On hierarchies of balanced sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2023, 69(5): 2923-2939.
- [9] 熊贤祚, 庞建华. DS/TH 扩频多址通信系统的原理与实现[J]. 成都电讯工程学院学报, 1985(S2): 23-33.
- [10] 孙志敏, 曾祥勇, 许雪莹, 等. 给定 k-错非线性复杂度的有限长二元序列的分布[J]. 密码学报(中英文), 2024, 11(2): 466-484.

- [11] WICIK R. Generating and testing binary random sequences for classified information protection systems[C]// 2024 New Trends in Signal Processing (NTSP), Demanovska Dolina: IEEE, 2024: 1-7.
- [12] LOPACINSKI L, MALETIC N, HASANI A, et al. Bit error rate performance of real-valued spreading sequences in DSSS-CSK based wireless communications[C] // 2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW), Riga: IEEE, 2023: 67-71.
- [13] 陈华, 范丽敏. 扑克检测的参数选择(英文)[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008, 25(5): 631-638.
- [14] 国家密码管理局. GM/T 0005-2021, 随机性检测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [15] 张雨琦, 邹金慧, 马军. CEEMD 与 Lempel-Ziv 复杂度相结合的滚动轴承损伤程度评估方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(9): 1408-1414.
- [16] NASROLLAHI M, TANHA R S, HOOSHMAND M. Lempel-Ziv-based Hyper-Heuristic solution for longest common subsequence problem[C] // 2023 13th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), Mashhad: IEEE, 2023: 124-128.
- [17] NOMAN K, ALI U, LI Y, et al. A novel nonlinear dynamic measure for early detection of bearing fault using weighted squared envelope-based symbolic Lempel-Ziv complexity[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-16.
- [18] 王乾, 王聪. 基于确定学习理论和 Lempel-Ziv 复杂度的非线性系统动态特征提取[J]. 自动化学报, 2018, 44(10): 1812-1823.
- [19] XIAO L, XUAN G, WU Y. Research on an improved chaotic spread spectrum sequence[C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA), Chengdu: IEEE, 2018: 420-423.