

团

体

标

T

准

T/CEATEC 261—2026

水声通信系统伪随机编码技术规范

Technical specifications for pseudorandom coding in underwater acoustic
communication systems

2026 – 08 – 19 发布

2026 – 08 – 19 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 系统架构与编码原理 2

 4.1 编码功能定位 2

 4.2 序列生成 2

5 技术要求 2

 5.1 基本特性要求 2

 5.2 常用编码类型及参数要求 3

 5.3 编码设计适配要求 3

 5.4 环境适应性 4

6 测试方法 4

 6.1 测试环境 4

 6.2 自相关性测试 4

 6.3 互相关性测试 4

 6.4 统计特性测试 4

 6.5 水声信道性能验证 4

 6.6 环境适应性测试 5

附录 A（资料性） 常用伪随机序列生成方法 6

 A.1 m 序列 6

 A.2 Gold 序列 6

附录 B（规范性） m 序列本原多项式推荐表 7

 B.1 m 序列本原多项式推荐表 7

附录 C（规范性） Gold 序列优选对组合 8

 C.1 Gold 序列优选对组合 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：中科海声信息系统（北京）有限公司、北京交通大学、北京理工大学、山东协和学院、苏州声之源电子科技有限公司。

本文件主要起草人：赵俊霞、王目光、陈德胜、高学强、周益明。

本文件首次发布。

水声通信系统伪随机编码技术规范

1 范围

本文件规定了水声通信系统伪随机编码的系统架构与编码原理、技术要求、测试方法。
本文件适用于采用伪随机编码的水声通信设备的设计、开发、生产和检验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 B：高温
- GB/T 2423.4 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 Db 交变湿热（12h+12h 循环）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

伪随机序列 pseudo-random sequence

一种具有随机序列统计特性，但由确定性算法生成的、可以重复再现的序列。

3.2

m 序列 maximum-length sequence

由线性反馈移位寄存器产生的周期最长的二元序列。

3.3

Gold 序列 Gold sequence

由两个优选配对的m序列逐位模二加产生的序列族，具有良好的互相关特性。

3.4

自相关性 autocorrelation

伪随机序列与自身移位序列的相似程度，通常用相关函数表示，理想特性为“移位为0时相关值最大，其他移位时接近0”。

3.5

互相关性 cross-correlation

不同伪随机序列之间的相似程度，理想特性为“相关值绝对值尽可能小”。

3.6

主瓣与旁瓣 main lobe and side lobe

自相关函数中，零时延处的峰值为主瓣，非零时延处的峰值为旁瓣。

3.7

码长 code length

伪随机序列一个周期内的码元数量（N），对于二进制序列通常为 2^n-1 （n为线性反馈移位寄存器长度）。

3.8

码片宽度 chip width

单个伪随机码元的持续时间（ $T_c=1/R_c$ ， R_c 为码速率），用于衡量抗多径能力（需小于多径延迟差）。

3.9

巴克码 barker code

一种特殊的有限长度二进制序列，具有极低的自相关旁瓣特性。

3.10

混沌序列 chaotic sequence

由非线性混沌系统通过迭代生成的伪随机序列。它具有对初始条件的极端敏感性、非周期性、类随机性和遍历性等特性。

3.11

水声信道 underwater acoustic channel

以水体为物理传播介质，以声能量为载体实现水下信息无线传输的通道，包含海水、海底、海面等传播环境及声信号传播规律、特性对传输的影响。

4 系统架构与编码原理

4.1 编码功能定位

伪随机编码在水声通信系统中主要用于：

- a) 帧同步：作为帧头，用于数据包的起始检测和定时同步；
- b) 信道探测：作为探测信号，用于估计信道冲击响应；
- c) 直接序列扩频：作为扩频码，将信息频谱展宽，提升抗干扰能力。

4.2 序列生成

系统应能生成本文件推荐的伪随机序列。生成算法应稳定、可靠，序列周期、初相可配置。常用序列生成方法参见附录A。

5 技术要求

5.1 基本特性要求

5.1.1 自相关性

5.1.1.1 归一化自相关峰值： ≥ 0.95 （移位为0时，相关值/码长）。

5.1.1.2 旁瓣最大值： ≤ 0.1 （移位非0时，相关值绝对值/码长）。

5.1.2 互相关性

5.1.2.1 不同编码序列间的归一化互相关最大值： ≤ 0.2 （多用户场景）。

5.1.2.2 单用户场景可放宽至 ≤ 0.3 。

5.1.3 统计特性

5.1.3.1 0/1 码元占比：45%~55%（平衡码要求）。

5.1.3.2 游程特性：长度为1的游程占比 $\approx 50\%$ ，长度为2的游程占比 $\approx 25\%$ ，长度 ≥ 3 的游程占比累计 $\leq 25\%$ 。

5.1.4 多普勒容限

5.1.4.1 伪随机序列为多普勒敏感序列，水声通信中由于水体流动、收发平台位移等原因，普遍存在多普勒效应。

5.1.4.2 在系统预期的最大多普勒频移范围内，序列自相关主峰峰值下降不得超过3 dB，主瓣宽度展增不应超过50%。

5.1.4.3 在多用户系统中，分配给不同用户或信道的序列，其码相位间隔应不少于信道最大时延扩展对应的码片数的4倍。在存在多普勒频移时，序列间的归一化互相关峰值仍应保持在-10 dB以下。

5.1.4.4 序列长度（以码片数计）应不小于信道最大时延扩展对应码片数的8倍。对于连续通信时间超过1 min的会话，伪随机码的周期应大于 10^6 码片，或采用周期跳变的码序列方案。

5.2 常用编码类型及参数要求

5.2.1 m 序列（最长线性反馈移位寄存器序列）

- 5.2.1.1 生成方式：基于线性反馈移位寄存器（LFSR），反馈多项式应符合本原多项式要求（见附录 B）。
- 5.2.1.2 周期： 2^n-1 （ n 为寄存器长度， n 宜取 7~20，对应周期 127~1048575）。
- 5.2.1.3 自相关性：非 0 移位时归一化相关值为 $-1/(2^n-1)$ （理论值）。
- 5.2.1.4 适用场景：单用户点对点通信、高精度同步场景。

5.2.2 Gold 序列

- 5.2.2.1 生成方式：由 2 个周期相同的 m 序列（优选对）逐位异或生成，优选对组合见附录 C。
- 5.2.2.2 周期：与基础 m 序列一致（ 2^n-1 ， n 为奇数且 $n \geq 5$ ）。
- 5.2.2.3 互相关性：最大值 $\leq 2^{-(n+1)/2}+1$ （归一化后）。
- 5.2.2.4 适用场景：多用户复用（如水下传感器网络）。

5.2.3 混沌序列

- 5.2.3.1 生成方式：基于 Logistic 映射， $x_{k+1} = \mu x_k (1-x_k)$ ， $\mu \in [3.5699, 4]$ 或 Lorenz 系统，量化精度 $\geq 8\text{bit}$ 。
- 5.2.3.2 周期：非周期性（实际应用中取截短长度 N ， N 宜为 1024~8192）。
- 5.2.3.3 初始条件敏感度：初始值差异 $\leq 1e-6$ 时，序列重合度 $\leq 10\%$ 。
- 5.2.3.4 适用场景：高安全性通信（如军事水下通信）。

5.2.4 巴克码

- 5.2.4.1 生成方式：巴克码通过穷举搜索或特定规则生成，其码元取值为 +1 或 -1（对应二进制 1 或 0）。已知的巴克码序列长度有限，包括 1、2、3、4、5、7、11 和 13 位。码表见表 1。

表 1 巴克码码表

码长	Barker 码序列（二进制）
2	11 或 10
3	110
4	1110 或 1101
5	11101
7	1110010
11	11100010010
13	1111100110101

- 5.2.4.2 周期：巴克码是非周期序列，其长度（即码组位数）即为实际使用的周期。最大已知长度为 13 位，更长序列需通过组合或扩展实现（如双巴克码）。
- 5.2.4.3 自相关性：取决于其具体长度。在零延迟（ $j=0$ ）时达到峰值 $R(0)=N$ （ N 为码长），而在其他非零延迟（ $0 < |j| < N$ ）时，自相关值的绝对值 $|R(j)|$ 均不超过 1，延迟超过码长度（ $|j| \geq N$ ）时， $R(j)=0$ 。
- 5.2.4.4 互相关性：不同巴克码序列间的互相关性较差（互相关值通常较高）。
- 5.2.4.5 适用场景：巴克码主要用于需快速同步和低旁瓣干扰的场景。

5.3 编码设计适配要求

5.3.1 与信道带宽适配

伪随机编码速率 R_c 应满足： $R_c \leq 0.8 \times B$ （ B 为水声信道可用带宽，单位为 Hz），避免信号带宽超出信道容量导致衰减。

5.3.2 抗多径适配

码片宽度 T_c 应满足： $T_c \leq t_{\min}/2$ （ $t_{\min}$ 为最小多径延迟差），确保多径信号可通过相关接收区分。

5.3.3 同步性能适配

5.3.3.1 同步捕获时间： $\leq 100\text{ ms}$ （短码， $n \leq 10$ ）； $\leq 1\text{ s}$ （长码， $n > 10$ ）。

5.3.3.2 同步跟踪精度： $\leq T_c/10$ （动态信道时延变化补偿误差）。

5.4 环境适应性

5.4.1 温度适应性

5.4.1.1 工作温度：浅海场景 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ ，深海场景 $-5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ；

5.4.1.2 存储温度： $-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 。

5.4.2 湿度适应性

在温度 40°C 、相对湿度 95%（无凝露）环境下，连续工作 72 h 无故障。

5.4.3 耐水压性

浅海场景耐水压 $\geq 0.5\text{ MPa}$ ，深海场景耐水压 $\geq 10\text{ MPa}$ ，持续加压 24 h 无渗漏、无功能失效。

6 测试方法

6.1 测试环境

在标准水声测试池或实际海域（浅海/深海）进行。测试系统应包括信号发生器、功率放大器、发射换能器、接收水听器、前置放大器、数据采集器及信号处理计算机。

6.2 自相关性测试

6.2.1 测试设备：信号发生器、示波器、相关器（或软件仿真平台如 MATLAB）。

6.2.2 测试参数设定：测试序列长度需覆盖各类型编码常用规格，m 序列、Gold 序列选取完整单周期码长（ n 取 7~20 对应周期 127~1048575），混沌序列选取标准截短长度 1024、4096、8192 码片，巴克码选取全规格标准码长（2、3、4、5、7、11、13 位）；移位量取值范围为 $0 \sim N-1$ （ N 为测试序列码长），移位步长为 1 码片，全覆盖所有移位工况，零移位用于测试自相关主瓣峰值，非零移位用于测试自相关旁瓣最大值。

6.2.3 测试步骤按以下内容进行：

a) 生成目标伪随机序列 $c(t)$ 及移位序列 $c(t-\tau)$ （ τ 为移位量）；

b) 计算相关函数： $R(\tau) = \int c(t) c(t-\tau) dt$ ，归一化后记录峰值及旁瓣最大值。

6.2.4 判定：符合 5.1.1 要求即为合格。

6.3 互相关性测试

6.3.1 测试参数设定：参与测试的 2 组不同伪随机序列 $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 需采用完全一致的码长，优先选用同阶 m 序列、同规格 Gold 序列、同长度混沌序列进行配对测试；移位量取值范围为 $0 \sim N-1$ （ N 为测试序列统一码长），移位步长为 1 码片，全覆盖所有移位工况，遍历所有相位偏移下的互相关特性。

6.3.2 测试步骤计算互相关函数 $R_{12}(\tau) = \int c_1(t) c_2(t-\tau) dt$ ，归一化后取最大值。

6.3.3 判定：符合 5.1.2 要求即为合格。

6.4 统计特性测试

6.4.1 测试方法：对长度 ≥ 10 个周期的序列统计 0/1 码元占比及游程分布。

6.4.2 判定：符合 5.1.3 要求即为合格。

6.5 水声信道性能验证

6.5.1 测试环境：水池（模拟多径）或实际海域（浅海/深海，根据应用场景）。

6.5.2 测试指标如下：

a) 抗干扰性能：在信噪比 $-10\text{ dB} \sim 0\text{ dB}$ 时，误码率（BER） $\leq 1e-4$ ；

b) 多径抑制：多径延迟差 $\geq 2 T_c$ 时，BER 较无多径场景恶化 ≤ 1 个数量级；

c) 同步性能：在动态时延（ $\pm 50\text{ ms}$ ）下，同步维持时间 $\geq 10\text{ min}$ ，同步丢失率 $\leq 0.1\text{次/h}$ 。

6.6 环境适应性测试

6.6.1 温度测试

按GB/T 2423.1、GB/T 2423.2，在工作温度极值下连续运行48 h，每小时检测1次编码输出，应无异常。

6.6.2 湿度测试

按GB/T 2423.4进行交变湿热试验，试验后检测编码特性，应符合5.4.2的要求。

6.6.3 耐水压测试

使用水压试验装置逐步加压至规定值，保压24 h，试验后模块外观无变形，功能正常。

附 录 A
(资料性)
常用伪随机序列生成方法

A.1 m 序列

m 序列由线性反馈移位寄存器产生。其生成本原多项式以八进制形式表示，如，一个 5 阶 m 序列，可使用本原多项式 $g(x) = x^5 + x^2 + 1$ （八进制表示为 45）来生成。

A.2 Gold 序列

Gold 序列由两个周期相同、且优选配对的 m 序列逐位模二加产生。通过改变两个 m 序列的相对相位，可以产生一个庞大的、具有良好互相关特性的序列族。

附 录 B
(规范性)
m 序列本原多项式推荐表

B.1 m 序列本原多项式推荐表

推荐表示例见表B.1。

表 B.1 m 序列本原多项式推荐表

寄存器长度 n	本原多项式（八进制表示）	周期
6	133	63
10	1751	1023
14	176735	16383

附 录 C
(规范性)
Gold 序列优选对组合

C.1 Gold 序列优选对组合

Gold序列优选对组合见表C.1。

表 C.1 Gold 序列优选对组合表

基础 m 序列多项式（八进制）	优选对多项式（八进制）	适用 n
133（n=6）	147	6
1751（n=10）	1695	10

T/CEATEC 261—2026

中 华 人 民 共 和 国
团 体 标 准
水声通信系统伪随机编码技术规范
T/CEATEC 261—2026

*

中国欧洲经济技术合作协会
网址 <https://www.ceatec.org.cn/>

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 4.2 千字
2026 年 8 月第一版 2026 年 8 月第一次印刷

*



T/CEATEC 261—2026

如有印装差错 由中国欧洲经济技术合作协会调换
版权专有 侵权必究
举报电话：010-64516951