深海声探测中伪随机编码信号的仿真研究

郭 璇[1,2]，郭英歌[1]，王润田[1]
(1. 中国科学院声学研究所东海研究站，上海 201815；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：目前国际上正在使用多脉冲(MultiPing)探测方式来解决深海探测中探测效率不高的问题，但可能存在回波识别和波达时间定位的问题，提出了利用伪随机编码信号的解决方法。以 6 000 m 深海海底探测为研究对象，设计发射不同编码信号，对其回波识别和定位进行了仿真和比较，同时对不同编码类型的回波识别性能随噪声变化情况进行了讨论。Walsh 码拥有更加出色的回波识别性能，但在波达时间定位方面易出现误差，同时随着噪声的增强，回波识别性能明显下降；m 序列拥有出色的波达时间定位性能，但回波识别性能不如 Walsh 码；Gold 码在回波识别性能和波达时间定位性能方面有着较好的平衡表现。

关键词：伪随机序列；编码信号；深海探测；回波识别；波达时间定位
中图分类号：TB56 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2019)-01-0046-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.01.007

Simulation of pseudo-random coded signals for the acoustic detection in deep-sea

GUO Xuan[1,2], GUO Ying-ge[1], WANG Run-tian[1]
(1. *Shanghai Acoustics Laboratory*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201815, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: At present, the MultiPing detection method is being used to solve the problem of low detection efficiency in deep sea exploration, but there may be some problems in echo recognition and TOA (time-of-arrival) location. In the paper a solution using pseudo-random coded signals is proposed. Taking 6000 m deep sea bottom detection as the study object, different coded signals are designed and transmitted, and their echo recognition and location are simulated and compared. At the same time, the variations of echo recognition performance of different coding types with noise are discussed. The study shows that the Walsh code has better performance of echo recognition, but errors are easy to occur in TOA location, and the performance of the echo recognition is obviously decreased with the increase of noise. The m sequence has excellent performance of TOA location,, but the performance of echo recognition is not as good as that of Walsh code. The Gold code has a good balance between echo recognition performance and TOA location performance.

Key words: pseudo-random sequence; coded signal; deep sea exploration; echo recognition; TOA (time-of-arrival) location

0 引 言

传统单波束声呐以单次收发为探测周期，通过避免回波信号的交叉而得到与发射信号的对应关系[1]。在深海海域，从海面对海底进行探测时，单波束探测周期往往达到几秒的时长。若以相同时间内的探测次数来描述探测效率，则其相比浅海明显降低。同时，伴随船体的行进，相同水平距离内的探测点个数明显减少，以致测线上的水平分辨率降低。

目前，国际上能够实现 6 000 m 及以上水深的声学探测设备大多应用 MultiPing 技术来改善这一问题[2]。即在深海探测过程中，以较短时间间隔(小于信号双程传播时间)连续发射声信号，保证同一时间内海洋信道中存在多列声信号共同传播，并以约等于发射间隔的时间采集回波信号。如美国 Benthos 公司生产的 ChirpⅢ设备[3]、SyQuest 公司生产的 Bathy2010™CHIRP 设备[4]等。但这种方法主要存在以下两点缺陷：① 不能明确回波信号的与发射信号的一一对应关系，回波信号顺序因海底地形起伏而改变，不同于发射顺序，或回波信号漏采集时将会出现数据无效的后果。② 因回波信号存储长度的限制，往往去除了部分水体数据，以致系统无法确认回波信号的发射时间，需通过海底跟踪

收稿日期：2018-02-06; **修回日期：**2018-03-28
基金项目：中国科学院声学研究所率先计划项目(SXJH201610)、上海市科委科研计划项目(16DZ1205300)。
作者简介：郭璇(1993－)，女，山西运城人，硕士，研究方向为声学信号处理。
通讯作者：郭璇, E-mail: guoxuan167@163.com

或人工预设来完善数据，容易产生误差。

针对以上问题，本文提出了基于伪随机编码信号的 MultiPing 技术，即以互不相同的伪随机序列编码声信号进行较为连续的探测。通过将发射信号与各列回波分别进行相关运算，根据伪随机编码良好的互相关特性，利用与之对应回波处的高相关峰值和其他回波处的低相关峰值的差异，即可实现回波的识别，获取与发射信号的一一对应关系。同时，只要采集到经过编码的回波信号，利用编码良好的自相关特性即可实现波达时间定位。

实际应用中，对伪随机编码信号的选择需考虑三点因素：① 回波识别性能；② 波达时间定位性能；③ 固定长度下可用的编码数量。回波识别性能以发射信号分别与各列回波信号相关运算得到的最大峰值与次大峰值差异的大小来衡量；时间定位性能以发射信号与对应回波信号相关主峰的尖锐程度和旁瓣高低来衡量。

本文在理论层面对三种编码的相关特性进行了比较，对深海条件下三种伪随机编码信号的回波识别和定位分别进行了仿真分析。

1　编码特性比较

m 序列、Gold 码、Walsh 码是三种具有代表性的伪随机编码，是 0 和 1 构成的二值序列。其生成已有十分成熟的方式，文中不做过多赘述。因编码序列具有周期性，而发射信号长度有限，本文应用只取其一个周期来产生对应的编码信号。

好的回波识别性能要求编码具有足够低的互相关峰值，互相关峰值愈小，识别性能愈佳；精准的波达时间定位要求编码具有尖锐的自相关峰和较低的旁瓣。同时，固定长度下需存在足够多的编码数量以满足实际应用的需求。

根据文献[5-7]，从自相关、互相关、编码数量三方面对单周期编码序列进行比较，结果如下表 1 所示。

表 1　不同编码信号的性能比较

Table 1　Performance comparison of different coded signals

	自相关	互相关	编码数量
m 序列	旁瓣低	峰值一般较小	少
Gold 码	旁瓣较低	峰值较小	多
Walsh 码	旁瓣高	峰值大多数极小	多

由表 1 可见，自相关特性：m 序列优于 Gold 码优于 Walsh 序列。互相关特性：Walsh 码优于 Gold 码优于 m 序列。编码数量：m 序列由 n 级线性移位寄存器根据本征多项式产生，且一个本征多项式仅对应一个 m 序列，故数量较少；Gold 码由 m 序列优选对移位模二相加产生，每对 n 级优选对序列可产生 2^n+1 个 Gold 码，因此数量较多；对于长度为 2^n 的 Walsh 码，其数量也为 2^n，数量也相对较多[5]。实际应用中，需要在自相关特性影响的定位性能、互相关特性影响的回波识别性能以及编码数量三者之间进行权衡。

2　深海应用中三种编码信号性能的仿真分析

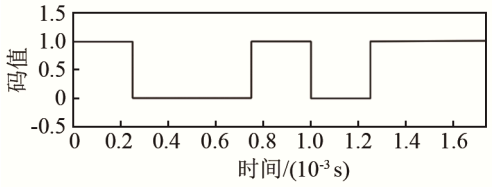
基于 MATLAB 建立 6 000 m 深海仿真系统。向海底发射伪随机编码信号，假设各列信号传播路径相同，海水声速起伏引起的相对差异为零，并设置等声速环境，声速为 1 500 m·s^{-1}。

2.1　回波识别性能

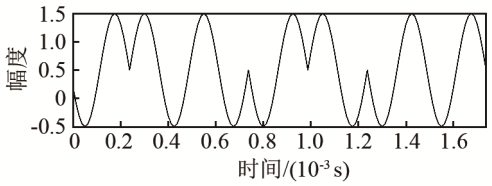
选取 5 列互不相同但长度均为 127 位的 m 序列，以如图 1 所示二进制相移键控的方式调制产生编码信号 m_1～m_5，并以 ΔT=200 ms 为时间间隔依次向海底发射。以 m_1 从海面发出时为 0 时刻，则 8 s 后 5 列回波依次到达，信号传播示意图如图 2 所示。考虑海水吸收系数、扩展损失和分界面反射损失，加入一定的海洋环境噪声对回波信号进行模拟，如图 3 所示。其中参数设置：声源级 L_{SP}=205 dB，正弦载波频率 f=4 kHz，回波信号信噪比 R_{NS}=3 dB。

以识别 m_2 回波信号为目的，将 5 列回波信号通过 m_2 相关滤波器，对其回波识别效果进行仿真。识别结果如图 4 所示。

为描述回波识别性能，定义参数辨识因子为：多列回波信号通过相关滤波器后，最大相关峰值与



(a) 二值序列



(b) 调制后波形示意图

图 1　编码信号生成

Fig.1　The generation of coded signal

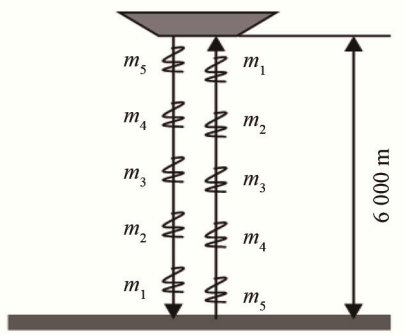


图 2 信号传播示意图

Fig.2 The schematic diagram of signal propagation

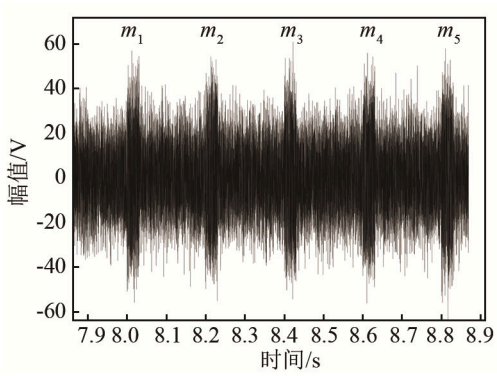


图 3 m 序列的回波信号

Fig.3 Echo signal of m sequence

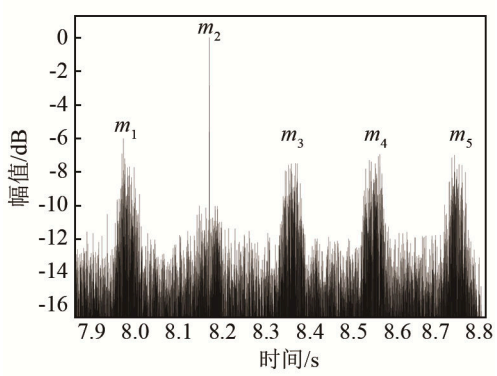


图 4 m 序列信号回波识别效果图

Fig.4 The effect diagram of echo recognition of m sequence signal

次大相关峰值之差。

图 4 中可见，在与 m_2 理论回波到达时间相符的 8.2 s 时刻处，形成了一个尖锐的峰值，其他 4 列回波时间处相关幅值较低，辨识因子达到了 6 dB 左右，具有明显的识别效果。

同样的方式，换做使用 5 列互不相同的 127 位 Gold 码产生编码信号 m_1～m_5，对 m_2 回波识别效果进行仿真，结果如图 5 所示。

从图 5 中可见，在 m_2 理论回波达到时间处峰值同样十分尖锐，与其他回波信号的相关峰值很低，辨识因子达到了 7 dB 左右，回波识别效果略优于 m 序列。

使用 5 列互不相同的 128 位 Walsh 码产生编码信号 m_1～m_5，对 m_2 回波识别效果进行仿真，结果如图 6 所示。

从图 6 中可见，在 m_2 理论回波到达时间处峰值很高，回波识别的辨识因子达到了 10 dB 左右，相比前两类编码，Walsh 码回波识别效果最好。

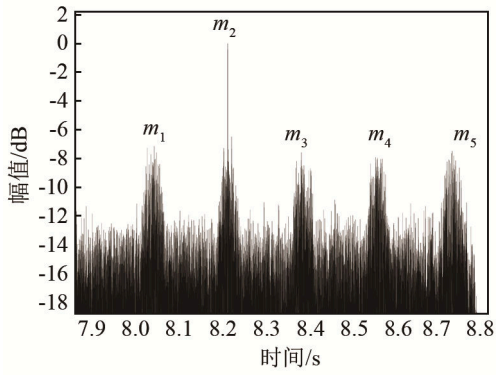


图 5 Gold 码信号回波识别效果图

Fig.5 The effect diagram of echo recognition of Gold code signal

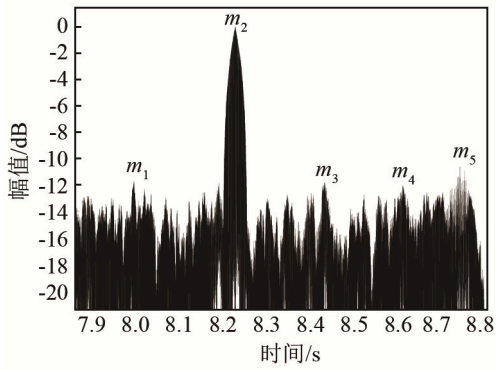


图 6 Walsh 码回波识别效果图

Fig.6 The effect diagram of echo recognition of Walsh code signal

当海洋环境噪声具有较大波动时，回波识别性能随噪声的变化情况则是一项必须考虑的内容。

设置回波信号信噪比为 9～–9 dB，间隔取 3 dB，对三种编码在不同噪声环境下的回波识别进行仿真。同样选取 5 列编码信号为研究对象，某信噪比下辨识因子的定义为 m_1～m_5 分别进行回波识别对应辨识因子的平均值，其随信噪比的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出同一信噪比下辨识因子的大小：Walsh 码>Gold 码>m 序列。随着噪声的增大，辨识因子减小的速度：Walsh 码>m 序列≈Gold 码，m 序列和 Gold 码回波识别性能受噪声影响较小，且这两类编码变化的趋势几乎没有差别，而 Walsh 码回波识别性能受噪声影响下降明显。

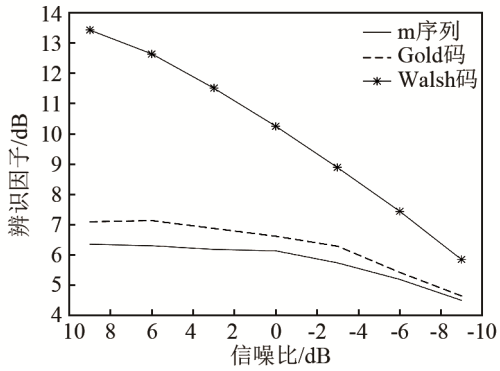


图 7　不同编码类型辨识因子随信噪比的变化曲线

Fig.7　Variations of recognition factor with SNR for different coding types

2.2　时间定位性能

依然以 m_2 回波时间定位为例，以三种类型编码为研究对象，分别将发射信号 m_2 与其识别的对应回波信号做相关运算，结果如图 8～10 所示。

从图 8 中可以看出，m 序列编码信号进行波达时间定位时，在理论波达时间 8.2 s 处，相关峰值尖锐，旁瓣低至−10 dB，可以获得较为精准的时间定位。

从图 9 中可以看出，Gold 码编码信号进行波达时间定位时，在理论波达时间 8.2 s 处，相关峰值同样尖锐，旁瓣虽然比 m 序列略高，在−7 dB 左右，但对实际影响不大，亦可获得较为精准的时间定位。

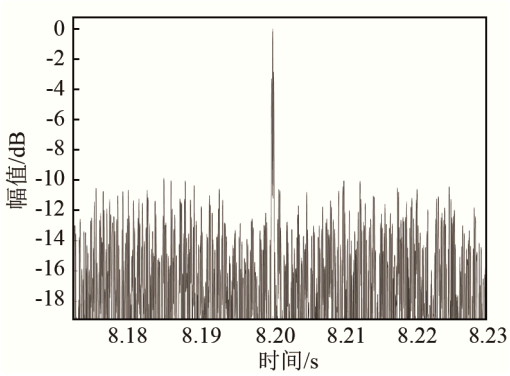


图 8　m 序列时间定位效果图

Fig.8　The effect diagram of echo time location of m sequence signal

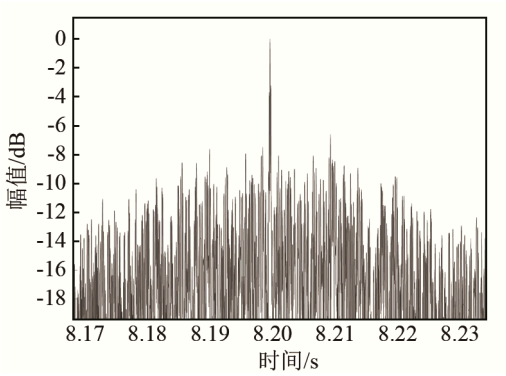


图 9　Gold 码时间定位效果图

Fig.9　The effect diagram of echo time location of Gold code signal

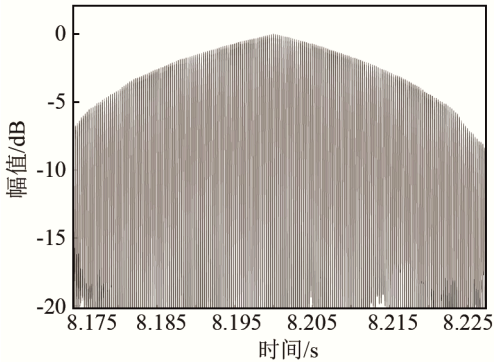


图 10　Walsh 码时间定位效果图

Fig.10　The effect diagram of echo time location of Walsh code signal

从图 10 中可以看出，Walsh 码编码信号进行波达时间定位时，在理论波达时间 8.2 s 处，相关包络下降十分缓慢，旁瓣很高，易受到干扰而引起偏差，相对前两类编码表现不佳。

3　总 结

本文利用通信中码分多址的思想，提出在时间上较为连续地发射伪随机编码信号，并通过其优良的相关特性实现回波识别和波达时间定位的方法。

对三种伪随机编码信号在自相关定位、互相关回波识别和编码数量三方面进行比较，得到以下结论：

(1) m 序列编码信号自相关定位性能最佳，互相关回波识别性能较好，但存在数量较少的问题。

(2) Gold 码编码信号自相关定位和互相关回波识别均有较好的平衡表现，数量也较多。

(3) Walsh 码互相关回波识别性能最佳，但自相关包络下降缓慢，易出现定位偏差。

因此，在实际应用中，若更加注重获得好的回波识别性能，在波达时间定位精度上可做适当让步，则可优先考虑使用 Walsh 码；若更加注重获得精准的波达时间定位，接收端噪声类似白噪声，则可优先考虑使用 m 序列和 Gold 码。另外需要注意的是，在环境噪声变化比较大的情况下，Walsh 码回波识别性能虽然比 m 序列和 Gold 码较好，但其随噪声的增强下降明显，应考虑其对系统中其他相关因素的影响。

参　考　文　献

[1]　胡昌顺. 单波束测深仪系统仿真设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大

学, 2012.
HU Changshun. System simulation design of single beam echo sounder[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
[2] 丁维凤, 李家彪, 苏希华, 等. 声学地层剖面深水探测研究与开发[J]. 海洋学报, 2015, **37**(6): 70-77.
DING Weifeng, li Jiabiao, SU Xihua, et al. Technology research and development for acoustic subbottom survey in deep sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, **37**(6): 70-77.
[3] Benthos Corporation. CAP-6600ChirpⅢ acoustic profiling system manual[OL]. 1996. http://www.benthos.com.
[4] SyQwest Incorporation. Bathy 2010TMCHIRP sub bottom profiler and bathymetric echo sounder[OL]. 2011. http://www. syqwestinc. com.
[5] 李婷. CDMA 扩频通信系统地址码的研究[D]. 大连: 大连海事大学,2006.
LI Ting. The study of the address code used in CDMA spreading spectrum communication system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006.
[6] 蒋强. GOLD 码相关性及可编程实现[J]. 微计算机信息, 2012, **28**(2): 136-137.
JIANG Qiang. The relevance and the program realization of GOLD[J]. Microcomputer Information, 2012, **28**(2): 136-137.
[7] 吴海红. CDMA 扩频通信中 m 序列与 Gold 序列的比较及应用[J]. 喀什师范学院学报(汉文版), 2010, **31**(3): 39-43.
WU Haihong. Comparison and application of in CDMA wide frequency correspondence M sequence and Gold sequence[J]. Journal of Kashgar Teachers College(in Chinese), 2010, **31**(3): 39-43.

• 简 讯 •

中国演艺设备技术协会演艺工程专业第五分会 2018 年度总结会成功举行

2019 年 1 月 10 日，中国演艺设备技术协会演艺工程专业第五分会 2018 年度总结会在上海举办。此次会议由中国演艺设备技术协会主办，演艺工程专业第五分会（简称：第五分会）协办，协会理事长朱新村、常务副秘书长兼综合部部长黄增光、上海分会会长周春志及第五分会委员、上海演艺设备行业专家及部分会员企业代表参加会议，上海市声学学会电声专业委员会严雷主任、建声噪声专业委员会杨志刚主任、宋拥民等专家及声学学会副秘书长、办公室成员应邀参加了此次会议。会议由第五分会秘书长周建国主持。

朱新村理事长为会议致词，他指出，当前国内外经济形势错综复杂，世界经济格局面临新的洗牌，要正确认识经济变化对行业发展的冲击和影响。在国内经济面临下行压力的形势下，文化旅游产业的大发展将成为新的经济增长点，呈现连年倍增的良好势头，演艺设备行业要抓住这一难得的发展机遇，坚持创意为先、科技支撑、内容为王，不断推进行业的创新发展。

上海分会周春志会长总结了过去一年中第五分会的各项工作，他指出：第五分会在人才培养上注重新老结合、梯次配备、以老带新，充分展现出了海派文化底蕴；组织技术交流时紧扣市场热点和行业需求，为会员单位搭建了良好的沟通交流平台。最后，他代表协会对支持单位、志愿者的辛勤付出表示衷心感谢！

广远电子技术股份有限公司（简称：广远）参会并为本次会议提供了音频系统。广远总经理朱四海、副总经理赵磊出席本次活动。作为协会理事单位，广远这一年在业内的进步，对专业音频行业的贡献以及对协会工作的支持、配合获得了朱新村理事长及周春志会长的肯定。

上海市声学学会