

# 基于水下等离子体的脉冲通信发射机

毛恒熙, 雷开卓, 史文涛, 李 棣, 辛天祺

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 水下声通信是海洋中最主要的通信方式, 在时变空变随机多途的恶劣信道中实现可靠的超远程水声通信, 是一项亟待解决的难题; 论文提出了一种利用水下等离子体脉冲信号、采用脉冲定宽时序编码调制方案的超远程水声通信体制, 研制了一种基于水下等离子体的微型脉冲声源, 搭建了基于该声源的脉冲通信发射机, 实现了入水自动检测、休眠定时切换、发射频率可调、码元调制编码等脉冲通信功能; 经水池试验验证, 该发射机在  $\Phi 60 \times 600$  mm 体积内声源级达 217 dB, 较好地实现预设脉冲信号的发射。

**关键词:** 水下等离子体声源; 声脉冲; 发射机; 水声通信; 脉冲定宽时序编码调制

## Pulse Communication Transmitter Based on Underwater Plasma

Mao Hengxi, Lei Kaizhuo, Shi Wentao, Li Di, Xin Tianqi

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Under water acoustic communication is a main form of the communications in oceans, but urgent solutions are needed to overcome one intractable problem of that: how to establish remote underwater acoustic communication and ensure its reliability and stability in such unfavorable underwater acoustic channels that are random temporal, spatially variable and of multipath. This paper proposes to build up a remote underwater communication system with the utilization of underwater plasma pulse signal and fixed width temporal order coding modulation. A micro underwater acoustic pulse source based on underwater plasma is designed and tested, based on which a transmitter for pulse communication is established. Several functions for pulse communication of the device is achieved: automatic start in water, clocked dormant system, adjustable emission frequency and the encoding and decoding of code elements. With the results of underwater experiments, the transmitter behaves well in the emission of pulse signals that are set previously, and the source level can reach 217 dB with the volume of  $\Phi 60 \times 600$  mm.

**Keywords:** underwater plasma sound source; acoustic pulse; transmitter; underwater acoustic communication; fixed width temporal order coding modulation

## 0 引言

水下等离子体声源, 是一种高功率、超宽带、能产生比传统换能器更高的声源级的新型声源<sup>[1]</sup>, 具有装置体积小、频响范围宽、声源级高、电声转换效率高、发射方式可调和可编程控制等显著特点。水下等离子体声源发射水中脉冲, 其产生的声脉冲的声辐射频谱在几十赫兹到几万赫兹之间, 覆盖了所有水声设备的工作频率, 且在低频段具有很强的声功率; 此外其声源级高, 传播距离远, 因而是一种理想的水下脉冲声源<sup>[2]</sup>。

脉冲通信是目前信息领域研究的一个前沿热点问题。脉冲通信信息的调制通常采用脉冲宽度调制 (PWM, pulse width modulation)、脉冲幅度调制 (PAM, pulse amplitude modulation) 和脉冲位置调制 (PPM, pulse position modulation) 方式。

针对等离子体声源的特点, 本文利用不同电压控制脉冲的重复频率, 提出了脉冲定宽时序编码调制方法。所设计的微型等离子体声源充分考虑水下通信的实际需要, 实现了发射装置小型化、入水自动工作、发射频率和工作周期可调、发射声源级

高且稳定等功能。论文介绍了所设计等离子体声源各个部件的参数配置和基本原理, 进一步采用脉冲定宽时序编码调制方法, 通过水听器接收, 从而实现预设脉冲编码发射。经实际测试表明, 具有声源级高、通信距离远等优点<sup>[3]</sup>。

## 1 水下等离子体脉冲声源结构及原理

水下等离子体脉冲声源主要由充电系统、储能电容、触发电路、触发开关、主控系统和放电电极组成<sup>[4]</sup>, 其结构原理框图如图 1 所示。充电系统为储能电容充电, 当储能电容电压达到预定值时, 触发电路发出一个高压脉冲, 导通触发开关, 从而使放电回路接通, 这样储能电容器储存的能量全部加在放电电极上, 使放电电极间发生激烈的高压放电, 形成水下等离子体, 并在放电过程中产生激波和气泡波两类声波——利用它们可产生强声脉冲信号<sup>[5]</sup>。控制触发电路的高压点火脉冲, 可通过触发开关控制强声脉冲信号产生时机, 即可对脉冲位置进行编码; 也可控制充电系统的充电速度, 让触发开关自触发从而实现脉冲频率进行编码。

本文研制的微型水下等离子体脉冲声源由供电模块、高压生成模块、储能电容、触发模块、控制模块和放电电极构成。下面分模块叙述其结构和原理。

### 1.1 供电模块

一般电池储能有限, 仅能够维持十几次放电, 并且随着电池放电内阻增加, 带负载能力下降, 导致充电时间变长。所以我们经过查阅相关资料及详细调研, 通过研究分析设计数种电

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-04-26。

基金项目: 国家自然科学基金(61501374, 61531015); 国家级大学生创新训练项目基金(201510699033)。

作者简介: 毛恒熙(1994-), 男, 山东菏泽人, 主要从事电子信息工程方向的研究。

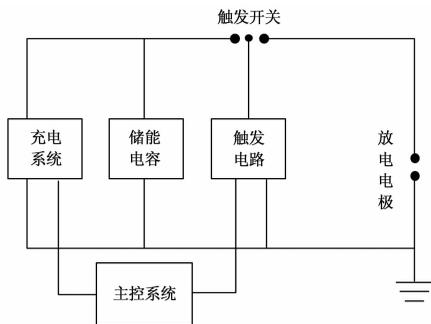


图 1 水下等离子体脉冲声源结构原理图

池串并联方案，最终选定方案 2 串 4 并电池组合，实现了微型脉冲声源供电要求 6~7.5 V。

### 1.2 高压生成模块

高压发生器的作用在于把供电低压转换成直流高压输出，并在短时间内对高压脉冲电容进行充电，达到设定的充电电压。基本要求是输入电流大、输出直流电压高、能长时间稳定工作、绝缘强度高、充电时间尽量小，所以要求高压发生器的功率较大（达 30 W 左右）。此外，根据对整个系统体积的要求，高压充电部分所占的体积也应越小越好。经过市场调研，选择了 JL-6X 型高压发生器，体积小，重量轻。

### 1.3 储能电容

储能电容起着储存、释放能量的作用。对于储能系统，要求电容大容量、高耐压、低损耗、低感抗。同时本脉冲声源对电容高压储能，工作时高压放电，要求脉冲电容器能够承受 10 kV 以上高压，故选用高压脉冲电容作为储能单元。经调研，在保证性能的情况下，我们得到了体积较小、适装性较好、重量轻的高压脉冲电容，通过多只并联方式提高能量，减小寄生电感。

### 1.4 控制模块

1) 休眠定时切换系统。脉冲声源的连续长时间工作会导致放电电极的损坏，休眠定时切换系统的作用即在于可使声源在工作一段时间后自动休息，从而避免了人工反复的拆卸。微型高功率脉冲声源脉冲发射周期控制系统由“555 定时器”构成，具体由 NE555 芯片及片外定值电容、定值电阻及可变电阻组成，构成多谐振荡器，组成信号发生电路。通过改变可变电阻阻值的大小，控制输出方波的占空比，进而设定不同的放电周期。

放电周期计算公式为：

$$T = 0.693(R_1 + 2R_2)C \quad (1)$$

2) 发射频率控制系统。储能电容充电时间的控制是由改变储能电容的充电电流实现的，即在供电模块与高压发生器之间增加了 DC-DC 电压变换电路，实现了供电电压 6~9 V 与输出电压 3~7 V 间的变换。改变高压生成模块供电电压就改变了输出充电电流，从而改变电容充电时间，实现了对发射频率的调控。此模块在实际应用中将用于脉冲的编码调制。

3) 入水自动工作系统。在实际应用中，需要声源入水自动工作，故设计了入水检测模块。此模块是通过比较器判决入水工作和离水的电压来实现的。离水时电路为开路状态，此时电压值较低，比较器输出低电平，系统不工作；入水时由于水溶液的导电性电路导通，此时电压值为高，比较器输出高电

平，系统开始工作。

### 1.5 触发模块

触发开关的作用是在导通之前把充电回路和放电回路分离开来，保证充电过程和能量存储顺利完成并在两端的电压达到一定大小时迅速击穿导通，使储能电容上储存的能量在极短的时间内（ $\mu\text{s}$  量级）释放到放电电极两端，完成水下放电过程。目前在水下脉冲声源装置中，最常用的触发开关类型是半导体开关和和场畸变火花间隙开关。由于本模块为自触发方式，故采用 CF-1A 型触发器。

### 1.6 放电电极

放电电极作用在于在触发开关提供的瞬间高压下将电极间的水溶液击穿，形成等离子体通道，进而产生巨大的声脉冲。目前在等离子体脉冲声源装置中，常用的电极类型有电弧放电电极和电晕放电电极两种。由于本装置设计声源级目标在 210 dB 以上，故选择能产生强烈声脉冲效果的“尖-尖”型电弧放电电极，以同时具备铜的高导电率、低损耗率和钨的高熔点等优点的铜钨合金为电极材料。

本小节介绍了所研制的微型声源的结构和工作原理，由于其独到的控制模块，不仅实现了发射频率控制和自动工作，而且使得基于等离子体声源的通信应用成为可能。

## 2 基于等离子体声源的脉冲通信发射机

### 2.1 脉冲通信发射机总体思路

在实际应用中可将该声源应用为脉冲通信发射机，构成脉冲通信系统如图 2 所示，包括发射端和接收端两部分。在发射端，DSP 对预发送的信息加密处理后进行信道编码，信道编码包括纠错编码和交织，以便进行差错分析，提高系统的可靠性。之后对编码信号进行程控数字调制，经过相应电路驱动等离子体脉冲声源产生调制后的强声脉冲串，并借助定向发射进入水声信道。经过水声信道后，接收端接收信号并解码得到发射信息。

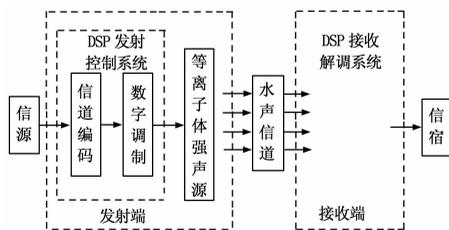


图 2 通信系统整体原理框图

### 2.2 跳时脉位调制 TH-PPM 发射信号模型

脉幅调制 (PAM) 和脉位调制 (PPM) 是脉冲调制的两种常用方法。PAM 是通过改变脉冲幅度的大小来传递信息的调制技术，但窄带脉冲在远距离传播时峰值衰减严重<sup>[6]</sup>，因此该调制方法不适用于水下远程通信。

经典的脉冲位置调制方式，是指将信息调制到码元出现在时间窗的位置信息中。结合 PPM 的方式，如图 3 所示，用预先编码的扩频码序列进行时移键控，称为跳时脉位调制 (TH-PPM, time-hopping position modulation)。对于抑制多个频带干扰的能力<sup>[7]</sup>，TH-PPM 要明显优于常用的直接序列扩频调制 (DS-SS, direct-sequence spread-spectrum) 和调频调制 (FH-SS, frequency hopping spread-spectrum)。

一般的 2-PPM 结合预先编码的单用户 TH-PPM 信号

可表示为:

$$S_T(t) = \sum_{j=-\infty}^{j=+\infty} \sqrt{E_p} \cdot W(t - jT_f - c_j T_c - \delta d_{(j/N_s)}) \quad (2)$$

式中,  $E_p$  是单个脉冲的能量;  $T_f$  是脉冲的平均重复时间;  $c_j$  是编码中的第  $j$  个码;  $T_c$  是编码的单位时移;  $c_j T_c$  是编码对第  $j$  个脉冲的附加时移;  $\delta$  是 2-PPM 的调制指数;  $d_{(j/N_s)} \in \{0, 1\}$  是待发送的二进制信息数据, 取  $j/N_s$  的整数部分;  $W(t)$  是发射的窄脉冲波形。

但 PPM 调制在加性高斯白噪声的环境下, 误码率相对较高, 而且脉冲信号将出现线谱<sup>[8]</sup>。线谱不仅使超宽带脉冲系统的信号难于满足一定的频谱要求, 而且会降低功率的利用率。

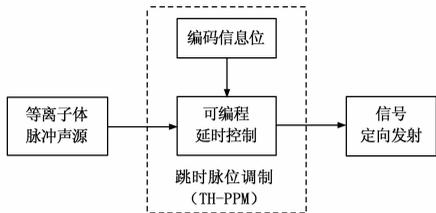


图 3 可进行时移键控的 TH-PPM

### 2.3 脉冲定宽时序编码调制发射信号模型

结合本系统的实际情况, 考虑到调制的可实现性, 提出了一种时域定宽的脉冲编码调制方式。

$$S_T(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q m_j \cdot p(T_i) p(T_j) \quad (3)$$

式中, 码元个数为  $k$ ;  $m_j \in \{0, 1\}$  是伪随机序列, 周期为  $q$ ;  $T_i$  表示对应码元的重复周期;  $T_j$  表示伪随机序列的周期。

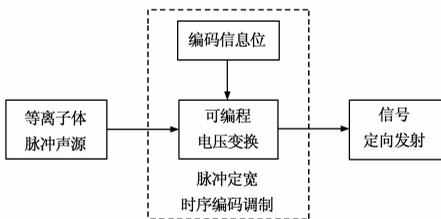


图 4 脉冲定宽时序编码调制原理图

如图 4 所示, 通过电压变换系统, 发射一定时宽的特定频率脉冲记作一个码元, 将编码信息和伪随机码通过可编程的电压变换系统发射, 实现脉冲定宽时序编码调制。这样虽然牺牲了部分传输速率, 但其误码率也将会大大降低。

伪随机序列的作用在于实现通信加密, 如图 5 所示, 将这种二进制数字信息和一个周期很长的伪随机序列模 2 相加, 这样得出的加密序列在信道中传输, 他人窃听后也不可理解其内容, 只有在接收端加上同样的伪随机序列, 才能恢复原发送消息。

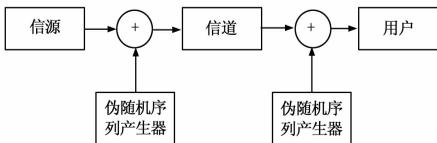


图 5 伪随机序列加密原理框图

宽时序编码调制的方式由于其脉冲间隔在单位发射周期内不变, 所以更适合本系统。

## 3 脉冲定宽时序的发射实验

### 3.1 实验系统搭建

实验水池环境: 长 3 m 宽 1 m 深 1 m, 盐度: 28 mS。

脉冲发射装置即为研制的水下等离子体微型声源。声脉冲测量系统由灵敏度为 -206 dB 的 BK8104 水听器和 HIKIO8860 数据采集仪所组成。水听器将测量到的声脉冲的压力信号变换成电荷信号。经内置的放大器放大变换为电信号后送入数据记录仪采集、存储、显示。

### 3.2 单一频率脉冲的发射性能实验

分别以 30 s 工作周期, 4 V、5 V、6 V、7 V 电压供电, 连续发射 5 组脉冲; 同步接收。采样频率: 500 kHz, 通道数: 1, 数据长度: 40 秒 (截取 5 s~35 s 部分)。

声源级  $SL$  可由公式 (4) 换算得 (假设发射器无指向性):

$$SL = 206 + 20 \cdot \lg s + 20 \lg V_o \text{ (dB)} \quad (4)$$

式中,  $SL$  为声源级, 单位为 dB;  $s$  为水听器距声源的距离, 单位为 m;  $V_o$  为水听器检测到的电压。

经实验测得的脉冲频率和声源级如表 1 所示。

表 1 发射脉冲频率和声源级

| 电压/V | 重复频率/Hz | 平均声源级/dB | 声源级最大偏差/% |
|------|---------|----------|-----------|
| 4    | 0.100   | 216.5    | 0.41      |
| 5    | 0.200   | 217.9    | 1.12      |
| 6    | 0.333   | 217.6    | 0.83      |
| 7    | 0.467   | 213.1    | 0.82      |

### 3.3 单一频率脉冲串的编码发射

为了简化对脉冲定宽时序调制的分析, 作如下假设: (1) 调制不采用伪随机序列。在脉冲定宽时序调制中, 伪随机码的主要作用是利用其具有随机噪声的特性, 实现了一定程度的通信加密, 故在验证发射性能时, 可不采用伪随机码; (2) 码元的个数为 2。调节 DC-DC 变换器, 使输出电压为 6 V, 连续发射脉冲 40 秒, 记录脉冲串时域波形如图 6 所示; 调节 DC-DC 变换器输出为 7 V, 连续发射脉冲 40 秒, 记录脉冲串时域波形如图 7 所示。

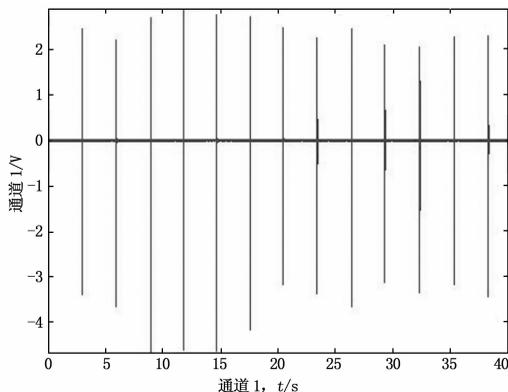


图 6 40 s 内 6 V 脉冲串时域波形

从图 6 和图 7 可以看出, 5~35 s 的时间间隔内, 6 V 供电产生了 10 个脉冲, 7 V 供电产生了 14 个脉冲, 区分度明显, 且

从公式 (3) 可以看出, 相较于 TH-PPM 调制, 脉冲定

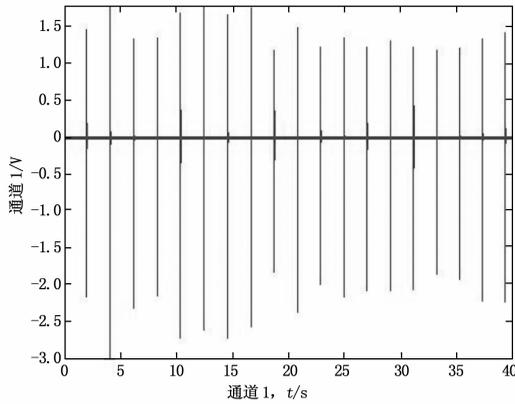


图 7 40 s 内 7 V 脉冲串时域波形

声源级稳定<sup>[9]</sup>、单个脉冲的声源级上偏差较低 (<1%)，波特率高，适合编码。故本文将 6 V 编码为 0 码元，7 V 编为 1 码元。

### 3.4 任意编码通讯发射实验

以 30 s 工作周期发射码元 0101，重复发射 5 组编码；同步接收，数据采集仪所记录时域波形如图 8 所示。由图 8 可知，发射 0101 的脉冲串波形较为平稳，实际接收该发射信号时只需在约定的时间内检测脉冲的数目即可。这种脉冲脉冲定宽时序编码调制方式有着误码率低、稳定的优点<sup>[10]</sup>。

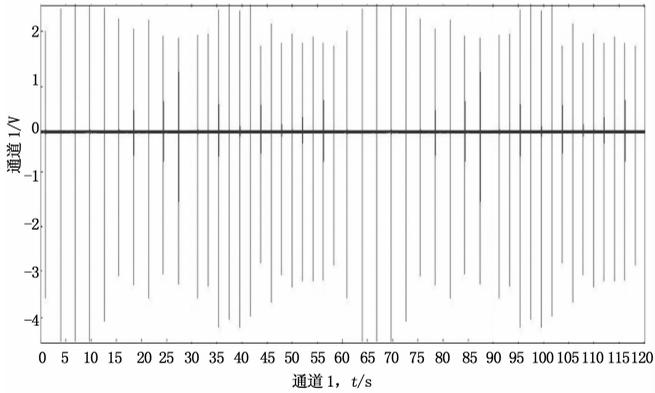


图 8 0101 脉冲串时域波形

(上接第 303 页)

综上，方案 4 和方案 5 均可作为现场标定方案，方案 5 优于方案 4，并且仿真结果与 2.2 节可观测度的计算结果相吻合。

## 4 结论

为了完成现场标定的任务，分析了儿种不同现场标定方案下陀螺漂移的可观测度，确定出两种最优的现场标定方案：在以速度为外部观测量的情况下，使载体处于“S”型机动状态；在不要求载体的机动性的情况下，增加系统的外部观测信息量即姿态信息。在组合对准阶段可实施上述两种现场标定方案，准确的估计出陀螺漂移。

若实际有需要，可以进一步拓展发射电压，从而增加码元的个数来提高传输速率。同时也可辅以信道编码、添加伪随机序列等方法适应实际的编码需要。

## 4 结论

本文使用的等离子体脉冲声源，在  $\Phi 60 \times 600$  mm 体积内发射声源级达 217 dB，而且实现了入水自动工作、发射频率可调及休眠定时切换等功能，操作方便，较同类声源有着质量轻、体积小、声源级高的优点，在行业界处于领先地位。

发射信号为脉冲信号，具有瞬时、高频带等特点，很难通过提取载波频率来分析发射信号，具有良好的频域隐蔽性。

整机编码通信发射实验表明，该声源能稳定、高效地发射预设类型水声信号。随着水下等离子体声源技术的不断发展，该发射机将在水下通信、海洋资源开发及海上军事防务发挥其独特优势。

### 参考文献：

- [1] Fang K, Jia E, Cheng F Y. The Study On Time-variant Characteristics Of Under Water Acoustic Channels [A]. International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012) [C]. 2012.
- [2] Bobrovskii I V, Yagotinets V P, Bobrovskii I V, et al. Experimental study of an acoustic communication system in shallow water conditions [J]. Acoustical physics. 2013.
- [3] 梁 臣, 张群飞, 雷开卓. 基于超宽带技术的远程水声通信 [D]. 西安: 西北工业大学航海学院, 2011.
- [4] 刘小龙, 黄建国, 雷开卓. 水下等离子体声源的声效率分析与研究 [J]. 高技术通讯, 2012, 5 (22): 552-557.
- [5] 刘小龙, 雷开卓, 黄建国. 水下等离子体声源的研究与设计 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31 (7): 1072-1074.
- [6] 吴永胜, 杨爱英, 孙雨南. 基于 PPM 调制的低密度矩阵编码与译码 [J]. 电子学报, 2012 (10), 19775-1979.
- [7] 蒋 磊, 王永生, 郭建新. 超宽带 TH-PPM 调制技术抗干扰性能研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28 (5): 671-673.
- [8] 尹 禄, 陈 韵, 陈 冰, 等. 抗多普勒效应 FRFT-PPM 水声通信技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (2): 431-435.
- [9] 邱前宝, 冯西安, 雷开卓. 水下等离子体放电的电磁辐射脉冲测量方法 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1582-1585.
- [10] 崔小明, 何 轲, 雷开卓, 等. 水下窄脉冲超宽带信号的传播特性仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 218-220.

### 参考文献：

- [1] 尚 捷, 顾启泰. 捷联惯导现场最优标定方法研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13 (4): 18-21.
- [2] 陈明辉. SINS 误差特性及组合对准的方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [3] 程向红, 万德钧, 仲 巡. 捷联惯导系统的可观测性和可观测度研究 [J]. 东南大学学报, 1997, 27 (6): 6-11.
- [4] Goshen-Meskin D, Bar-Itzhack I Y. Observability analysis of piece-of wise constant systems, part I: Theory [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28 (4): 1056-1067.