

水下窄脉冲超宽带信号的传播特性仿真

崔小明, 何 轲, 雷开卓, 史文涛, 王会文

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 超宽带信号具有分辨率高、截获概率低、穿透能力强等优点, 将在水下目标探测、定位及通信等领域具有良好的应用前景; 基于水下等离子体声源提出了窄脉冲超宽带信号产生方法, 建立了以传播损失和海洋环境噪声为主要影响因素的超宽带脉冲传播信道模型; 结合湖试实测数据, 利用 Matlab 仿真软件和 Welch 谱分析法, 仿真分析了不同频率的超宽带脉冲在水下传播不同距离后的功率谱密度以及传播特性; 研究成果对水下等离子体超宽带脉冲的工程应用具有重要的参考价值, 同时对水下等离子体超宽带脉冲声源的设计和研制也有一定的借鉴意义。

关键词: 水下等离子体; 超宽带脉冲; 传播特性; 功率谱密度

Simulation of Propagation Properties of Underwater Narrow Pulse and UWB Signal

Cui Xiaoming, He Ke, Lei Kaizhuo, Shi Wentao, Wang Huiwen

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Ultra Wide Band (UWB) signal has the advantages of high resolution, low intercept probability, strong penetration ability, and has a good prospect of application in the fields including underwater target detection, localization and communication. This paper presents a generation method of UWB pulse based on the underwater plasma sound source, and establishes the communication channel model of UWB pulse based on the main influence factors including propagation loss and marine environmental noise; Combined with the lake trial data, using Matlab simulation software and Welch spectrum analysis method, the Power Spectrum Density (PSD) of different frequency of UWB pulse propagating to different distances has been studied. The study results have an important reference value to engineering application of underwater plasma UWB pulse, and also have a certain reference significance to design and development of underwater plasma UWB pulse sound source.

Keywords: underwater plasma; UWB pulse; propagation characteristics; PSD

0 引言

超宽带 (UWB, ultra wide band) 无线目标检测是信息领域研究的一个前沿热点问题^[1]。UWB 凭借其超宽的信号带宽、较低的发射功耗以及高数据速率等特点, 在无线通信、定位和探测领域得到广泛应用^[2-3]。然而, 水下超宽带信号的产生机理、传播特性和发射方式与空中无线超宽带信号存在着较大的差异, 例如, 空中 UWB 信号的传播特性随频率衰减不明显, 而水下声纳信号却随工作频率按 $-0.036 Rf^{1.5}$ (dB/km/kHz) 衰减。因此, 要用 UWB 脉冲实现目标探测, 还受到发射方法和水声信道传播特性的限制, 尤其是不同发射频率的 UWB 脉冲远程传播时吸收衰减差别较大, 会导致 UWB 脉冲畸变严重。因此, 研究水下窄脉冲超宽带信号产生方法、波形特性和传播特性, 对超宽带技术在水声领域的应用具有重要意义。

1 水下等离子体 UWB 脉冲的产生

本文提出利用水下等离子体声源来产生 UWB 脉冲波^[4-5]。水下等离子体声源的工作原理是基于前苏联科学家尤特金于 1955 年提出的“液电效应^[6]”, 其基本组成结构如图 1 所示, 主要由控制器、高压发生器、储能单元、触发电路、触发电极、放电电极等部分组成。其工作原理是, 当声源工作时, 高压发生电路将交流低压升到所需高压, 并整流成直流高压, 当充电电路对大功率储能电容完成充电储能, 充放电控制系统控制触发电路发出高压脉冲, 使触发电极击穿导通, 这样, 电容

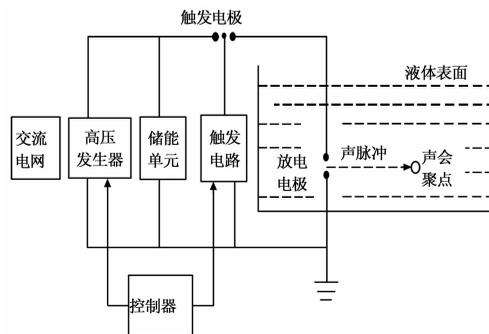


图 1 水下等离子体声源基本组成结构

收稿日期: 2014-05-19; 修回日期: 2014-06-23。

基金项目: 国家自然科学基金(1097154); 电子信息控制国家重点实验室基金(NKF201307190058)。

作者简介: 崔小明(1989-), 男, 陕西旬邑人, 硕士生, 主要从事船舶与海洋工程专业方向的研究。

雷开卓(1965-), 男, 副教授, 主要从事水声工程和信号与信息处理方向的研究。

储存的电能通过置于流体介质中的放电电极在极短的时间内产

生脉冲放电, 将流体介质迅速气化, 产生高温高压等离子体, 进而在流体介质中产生巨大的冲击波并释放出强烈的热、光、声辐射的现象。

本文中, 为了使研究的结果更加真实可信, 我们采用了某湖试现场测量的水下等离子体声脉冲实验数据, 以此作为水下等离子体 UWB 的发射脉冲来进行研究。实测得到的水下等离子体 UWB 声脉冲波形如图 2 (a) 所示, 其功率谱密度如图 2 (b) 所示, 从图中可以看出, 采集的水下等离子体声脉冲是一个极窄超宽带脉冲, 具有超宽带、低功率等典型的极窄脉冲超宽带信号的特性, 是一个性能优越的水下 UWB 脉冲。

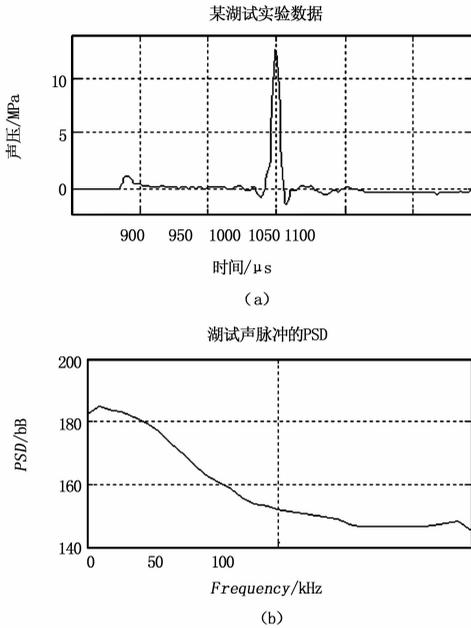


图 2 水下等离子体 UWB 声脉冲实测数据波形及 PSD

2 水下 UWB 脉冲的传播信道建模

由于电磁波在水中传播时衰减严重, 而声波是人类迄今为止已知的唯一能在水中远距离传播的能量形式, 所以海洋中检测、通信、定位和导航主要利用声波。然而声波在水下传播情况非常复杂, 主要是因为噪声干扰以及声波自身的传播情况。本文中, 建立的信道模型假设只考虑声波的传播损失和海洋环境噪声^[7-8]。

传播损失 (PL) 是度量声源到远处接收机之间声强衰减大小的一个物理量。本文中, 在设计初期和性能比较的过程中, 将传播损失考虑为球面扩展损失和吸收损失之和, 是非常实用的计算法则, 传播 r 米距离的传播损失为:

$$PL = 20 \times \lg r + \alpha r \times 10^{-3} \text{ (dB)} \quad (1)$$

吸收系数 α 随频率的增加而迅速增加, 随温度的变化而变化。它同样随深度和盐度的不同而发生变化, 但变化并不明显。在频率为 0.5 kHz 到 100 kHz 的范围内, “标准” 条件下海水的吸收系数 α 的近似式为:

$$\alpha = 0.05 f^{1.4} \quad (2)$$

式中, α 的单位为: dB/km, f 的单位为 kHz。

海洋环境噪声是水声信道中的一种干扰背景场。本文中, 将海况以及信号带宽作为参考因素, 参考 Kundson 谱曲线,

如图 3 所示, 可求出海洋环境噪声级 NL。

本文建立的模型不仅可以对传播损失进行计算, 也可以对更复杂的传播模型进行研究, 所以该假设常常带来特别的益处。但折射、散射和海洋边界 (海面和海底) 的存在, 而且事实上, 要精确估计海况是非常困难的, 所以, 自由声场条件在实际海洋中根本不能满足。因此至今仍然有许多工作正致力于建立可靠的模型上。

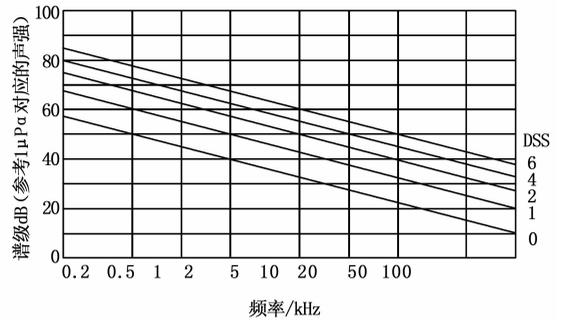


图 3 Kundson 海洋环境噪声谱

3 水下 UWB 脉冲的传播特性仿真

水下等离子体声源产生的经一定距离的衰减后, 声脉冲传播规律符合线性声学中点声源发出的声脉冲球面扩展规律, 在这种情况下利用线性声学的相关理论方法进行声场分析, 因此仿真中将扩展损失考虑为球面扩展损失。

3.1 基于 Matlab 的 Welch 法 PSD 仿真方法

Welch 法^[9]采用信号重叠、加窗函数和 FFT 等算法来计算一个信号序列的功率谱密度^[10-11] (PSD, Power Spectral Density)。Matlab 信号处理工具箱提供专门函数 psd 来实现 Welch 法估计, 调用格式:

```
pxx=psd(x)
pxx=psd(x, nfft); pxx=psd(x, nfft, fs, window)
[pxx, f] = psd(x, nfft, fs, window, noverlap); pxx
=psd(x, ..., dflag)
```

本文中, 用来进行仿真研究的实验数据是一个水下 UWB 单频脉冲, 因此, 笔者用采集的原始数据, 在完整保留窄脉冲部分数据的前提下, 假设了脉冲的其余部分数据都为零, 基于 UWB 脉冲的峰值频率设计^[12-13], 通过 Matlab 仿真软件编写程序, 以达到实验数据的采集以及数据的重新整合, 重新得到了包括 5 Hz、10 Hz、15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz、35 Hz、40 Hz、45 Hz、50 Hz 频率的 UWB 脉冲。鉴于本论文研究的重点, 可以认为在允许的范围之内, 做这种数据处理是合理的。

3.2 仿真结果及分析

利用上一节建立的水下 UWB 脉冲传播信道仿真模型, 基于 Welch 功率谱分析法, 本文仿真研究了不同频率的水下 UWB 脉冲在传播了距离声源中心 100 m、200 m、500 m、1 km、2 km、3 km、4 km、5 km 后的功率谱密度。如图 4 所示, 在仿真中, 保持脉冲的重复频率不变, 从而来研究传播距离的变化对声脉冲特性的影响; 而图 5 中, 在仿真中保持脉冲

的传播距离不变, 从而来研究脉冲重复频率的变化对声脉冲特性及传播特性的影响。

由图 4 可以看出, 随着 UWB 脉冲传播距离的增大, UWB 脉冲的功率衰减速率增加, 然而我们发现, 在 UWB 脉冲传播到 2 km 以后, 功率衰减的速率开始加快, 而在 2 km 之前, 功率衰减速率很缓慢, 衰减幅度都在 10 dB 左右; 例如从 0~100 kHz, 当传播到 100 m 的时候, UWB 脉冲功率衰减不到 10 dB, 而当传播到 5 km 的时候, 衰减超过了 30 dB。

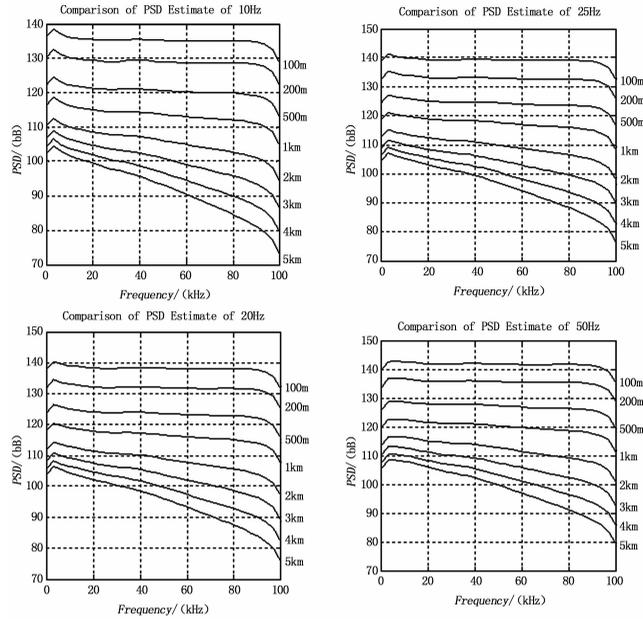


图 4 传播不同距离后的 UWB 脉冲 PSD

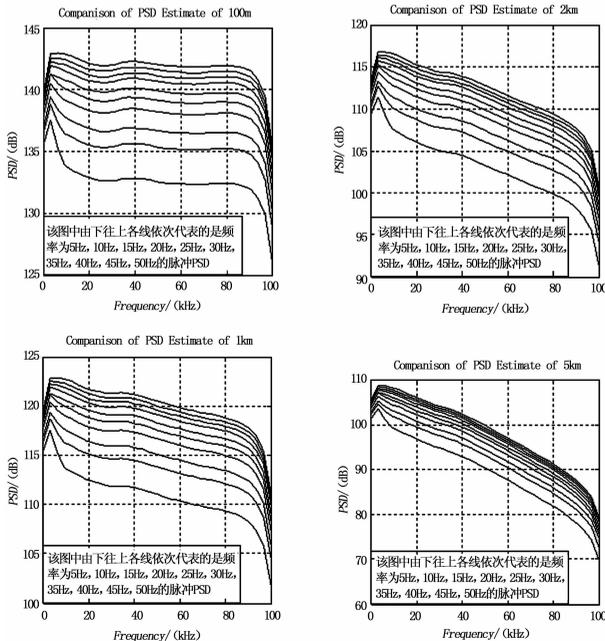


图 5 不同频率的 UWB 脉冲的 PSD

由图 5 可以看出, UWB 脉冲的能量多集中在低频成分, 并且 UWB 脉冲的 PSD 峰值在 5 kHz 左右; 很显然随着 UWB

脉冲频率的增加, UWB 脉冲功率密度不断增加, 但由仿真的结果可以看出, 当 UWB 脉冲的发射频率达到 25 Hz 之后, UWB 脉冲频率的增加对功率谱密度的影响已经非常小。

4 结论

本文提出了水下等离子体 UWB 脉冲的产生方法, 通过仿真分析, 主要研究了水下等离子体 UWB 脉冲波的 PSD 特性。本文中, 对 UWB 脉冲在海洋中的传播信道进行分析建模, 利用仿真软件 Matlab 对不同频率的 UWB 脉冲在传播不同距离后的功率特性的变化规律进行了仿真研究。研究表明, UWB 脉冲的能量多集中在低频成分, 并且 UWB 脉冲的 PSD 在 5 kHz 左右达到峰值。而且当 UWB 脉冲的发射频率达到 25 Hz 之后, UWB 脉冲频率的增加对功率谱密度的影响已经非常小。并且发现, UWB 脉冲在传播距离 2 km 之前, 衰减幅度很小。

基于以上的研究及分析结果, 可以看出, 将发射机的发射频率设计为 20 Hz 左右是较为理想和经济的, 而且在作用距离超过 2 km 以后, 脉冲的衰减严重。因此, 本文对水下等离子体 UWB 脉冲发射机和接收机的设计有着重要的参考价值 and 意义。

参考文献:

- [1] Yang L, Giannakis G B. Ultra-wideband communications; an idea whose time has come [J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2004, 21 (6): 26-54.
- [2] 熊海良. 超宽带无线通信与定位关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [3] Lei K, Zhang Q, Qiao Z, et al. Response characteristics of sonar receiver under intense sound pulse [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 23 (6): 843-848.
- [4] 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): 1071-1074.
- [5] 张洪欣, 吕英华, 贺鹏飞, 等. 一种基于脉冲压缩的 UWB 成形脉冲设计方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2007, 29 (1): 132-135.
- [6] 尤特金, 家 珊. 工程技术. 液电效应 [M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [7] 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.
- [8] 梁 臣. 基于 UWB 技术的远程水声通信 [D]. 西安: 西北工业大学, 2011.
- [9] 张佳明, 马秀荣, 秦宝连, 等. 非参数模型谱估计算法性能比较 [J]. 天津理工大学学报, 2009, 25 (4): 19-22.
- [10] 迟永钢, 张乃通, 王 芳. 脉冲超宽带通信系统功率谱分析与控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28 (2): 222-227.
- [11] 陆旻琪, 汪 敏. UWB 信号波形及功率谱密度的分析 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2005, 11 (4): 335-340.
- [12] Nakache Y P, Molisch A F. Spectral shaping of UWB signals for time-hopping impulse radio [J]. Selected Areas in Communications, IEEE, 2006, 24 (4): 738-744.
- [13] 邹卫霞, 张春青, 周 正. 基于峰值频率设计 UWB 脉冲的算法 [J]. 通信学报, 2006, 26 (9): 74-78.