

基于气枪声源的远程水声通信方法

张晓亮¹, 赵安邦², 易可佳¹, 曾财高², 皇甫立¹, 潘悦¹

(1. 水声对抗技术重点实验室, 北京 100036; 2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种利用气枪作为声源的远程水声通信遥控的方法, 以扩大水下遥控范围, 支持水下多平台、多节点协同工作。从气枪声源产生脉冲信号的声源级、频率和多次发射的一致性分析了作为水声通信信号声源的可行性; 高声源级、低频段保证了脉冲信号在水下可远距离传播; 高一致性保证了气枪声源脉冲信号具有可编码性和高的检测正确率。针对指令级远程遥控信息传输需求, 提出了时延脉冲编码方法和信号检测识别方法。针对不同水文环境条件进行了仿真分析, 为实现远程水声通信遥控提供了一种可选的技术途径, 支持水下远距离多节点协同工作。

关键词: 气枪声源; 远程遥控; 脉冲编码; 水声通信

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0269-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.016

Air-gun based remote underwater acoustic communication

ZHANG Xiao-liang¹, ZHAO An-bang², YI Ke-jia¹, ZENG Cai-gao², HUANG Fu-li¹, PAN Yue¹

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Beijing 100036, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to remotely control long-distance underwater acoustic communication and to effectively extend action range, this paper proposes a method of using air-gun as a sound source for underwater acoustic remote control. Taking commercial air-gun as an example, the feasibility of the air-gun used for remote underwater acoustic communication is analyzed from three aspects: sound source level, frequency and consistency. High source level and low frequency ensure that sound pulse emitted by air-gun can be spread over a long range underwater and high consistency ensures that the sound pulse could be coded and detected accurately. According to the need for transmission of the instruction level remote information, the time-delay pulse coding method and signal detection method are proposed. The simulation is carried out in different hydrological conditions, and shows that the proposed methods are an achievable approach to remotely controlled underwater acoustic antagonistic equipment such as acoustic decoy, to provide reliable communication for long distance underwater operation from mother ship and to support cooperative work of far multi-nodes.

Key words: airgun source; remote control; pulse coding; acoustic communication

0 引言

随着水下作业平台由单平台向多平台协同作业方向的发展, 单纯依靠单平台设备已无法满足水下作业需求, 需要通过控制水下无人潜器等小型节点与母船的配合, 实施多节点协同的体系化作业, 这种协同范围可达数百公里, 需要有效的通信手段来支持。而水声通信技术能够支持水下作业节点在更远的距离进行遥控工作, 是拓展水下协同工作能力的关键。

在实际应用中, 近距离高速率的水声通信技术已经非常成熟, 可以实现图像、音频等信号的传输, 而远距离的水声通信受传输信道、环境干扰等因素

影响, 仍然存在诸多难以解决的技术问题, 如传播损失随着频率和传播距离的增加而增大, 可利用的信号带宽非常有限等。因此, 低频、大功率声源是实现远程水声通信的必要条件。

本文提出将气枪声源作为水声通信声源, 对其产生的低频大功率脉冲声信号通过合理的调制编码, 实现远距离水声通信, 预期能够达到上百公里的通信距离, 满足远距离低速率水声遥控需求。

1 气枪声源介绍

气枪声源利用高压气舱存储的高压气体, 在水下瞬间释放而产生强声波。由于其出色的低频大功率特性, 已被广泛应用于海洋地质调查、石油勘探、地震波研究等领域。目前, 应用最为广泛的气枪声源商用产品以美国 Bolt 公司生产的 BOLT 气枪声源、美国 ION 公司生产的 SLEEVE 气枪声源和法

收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-10-08

作者简介: 张晓亮(1979—), 男, 陕西岐山人, 硕士研究生, 研究方向为水声及水声对抗技术。

通讯作者: 张晓亮, E-mail: zxl.seri@163.com

国 CGG 公司生产的 G 气枪声源为代表, 其结构和工作原理基本相同, 如图 1 所示^[1]。

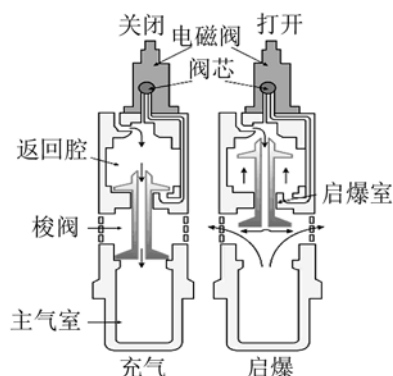
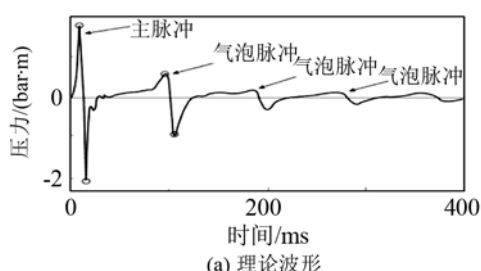


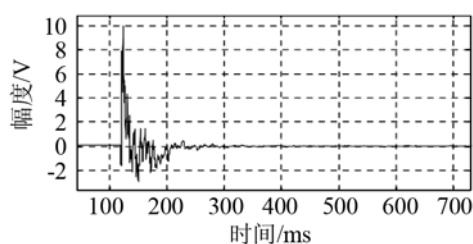
图 1 气枪声源的结构和工作原理示意图

Fig.1 Sketch map of the air-gun source structure and working principle

由空气压缩机产生的高压气体经高压气管进入气枪声源返回腔内, 当通过控制设备使电磁阀通电后, 主气室排气口打开, 主气室内的高压气体和返回腔内的高压气体同时迅速释放到水中, 完成一次发声, 产生脉冲声波。气枪声源产生的是脉冲串形式的声波, 但能量主要集中在主压力脉冲, 其脉冲波形理论波形与实际波形如图 2 所示^[2]。



(a) 理论波形



(b) 实际波形

图 2 气枪声源脉冲理论波形与实际波形图

Fig.2 Theoretical and actual pulse waveforms generated by air-gun source

2 远程水声通信方法

本文提出的远程水声通信方法是利用气枪声源在水下瞬间释放高压气体产生的低频大功率脉冲信号作为通信信号, 利用其可远距离传播的特性, 采用脉冲时延编码方式对脉冲信号进行编码, 实现远程水声通信, 需重点解决瞬时脉冲信号的编

码、检测和识别问题。

2.1 远程传播能力分析

由上面的介绍可知, 气枪声源产生的声波信号是以脉冲形式辐射的, 研究其声源级和谱特性, 需对声脉冲信号进行频谱分析。图 3 为实测的水下气枪声源信号的频谱图^[3], 可以看出, 水下气枪声源产生的声脉冲能量大、频率低, 声源级峰值可达 210 dB, 声波能量主要集中在 300 Hz 以下频段, 在水介质中的吸收损失小, 适合于远距离传播。按声呐方程理论计算, 假设海洋背景噪声级为 75 dB, 在满足最低可检测信噪比条件下, 声源级为 210 dB 的信号传播距离可达 300 km 以上。

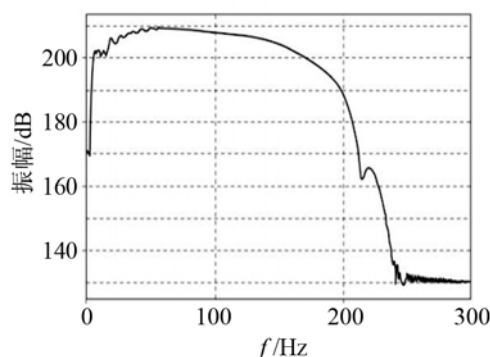


图 3 气枪声源声频谱特性

Fig.3 Air-gun source spectrum characteristics

为了获得更高的发射声源级, 同时满足连续发射的需求, 还可以采用多个气枪声源组阵的方式形成声源阵列, 如图 4 所示。该方法产生的声波能量大, 频率较低, 可通过调节气枪压力和释放口大小改变声源级、脉冲宽度和频率。



图 4 气枪声源阵列

Fig.4 Air-gun source arrays

2.2 脉冲信号仿真方法

气枪声源产生的强声脉冲波是由气泡在水中的振荡引起的压力波, 可以根据自由场气泡阻尼振荡理论仿真气枪声源产生的强声脉冲信号, 支持本文提出的方法研究。

气泡半径的非线性二阶微分方程见式(1):

$$\left(\frac{\partial a}{\partial t} - c\right) \left[a \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^2 - \Delta \right] + \frac{1}{a} \frac{\partial (a^2 \Delta)}{\partial t} - \left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^3 = 0 \quad (1)$$

式中： a 为气泡半径； c 为水中声速； Δ 为压力差， $\Delta(a)=\rho^{-1}[P(a)-P_0]$ ； $P(a)=k(4\pi a^3/3)^{-\gamma}$ 为气泡内部压力； P_0 为静水压力； ρ 为水的密度； γ 为热容比。

水中压力波场见式(2)：

$$P(r,t)-P_0=\rho\left[-\frac{f'}{r}-\frac{f''}{2r^2}-\frac{1}{2c}\left(\frac{f'^2}{cr^2}+\frac{2ff''}{r^3}\right)\right] \quad (2)$$

其中： $f=-a^2\frac{\partial a}{\partial t}+\frac{a^2}{c}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^2+\Delta\right]$ ； $f'=-a\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial a}{\partial t}\right)^2+\Delta\right]$ 。

式(1)只需要知道 a_0 (气泡初始半径)、 $\partial a_0/\partial t$ (气泡壁初始速度，通常为零) 以及 γ ，就可计算出气泡振荡的时间半径曲线，然后用式(2)计算出压力子波。

理论计算结果与实测情况有较大的差距，表现在子波振幅衰减程度比实测缓慢，子波振荡的周期逐渐减小的幅度比实测小。最主要的原因是能量损失，理论气枪模型对气枪激发时的能量损失和转换考虑不全。须对初始的气枪压力 P 和容积 V 作如下修正：

$$P'=P/x, \quad V'=Vx^\gamma \quad (3)$$

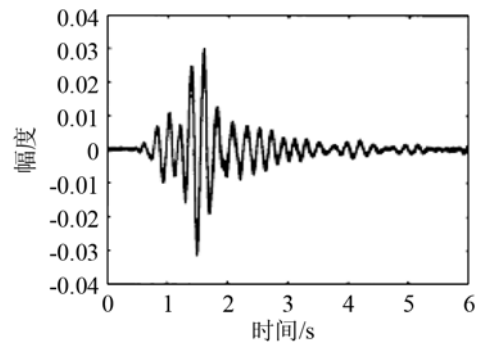
式中： γ 为热容比； x 是一个经验参数，通过对比大量的实测资料和理论计算结果， x 值取 7 到 9 之间的数值时将得到比较理想的结果^[4]。

2.3 脉冲信号编码方法

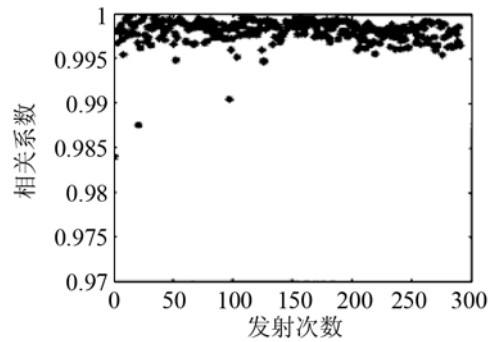
由于气枪声源在相同的声源结构和触发条件下，多次触发产生的声脉冲信号之间具有较好的一致性，如图 5 所示^[5]。由图 5 可知，某次试验中气枪声源多次发射统计相关系数为 0.996，波形一致性非常高。因此，气枪声源产生的声脉冲信号特征具有可控性和可重复性，可通过调节触发时延和气枪压力等可变参数对连续触发的脉冲串进行编码，用于指令级水声通信。

在实施远程低速率水声通信的同时，考虑到平台和信息的隐蔽性与安全性，只发送指令级信息，如“启动”、“工作模式 n”、“待机”等，对通信带宽要求不高，不需要很复杂的编码调制通信方式，可采用脉冲时延编码方式进行指令编码，可以利用多个脉冲的时间间隔来表示信息，有脉冲表示“1”，无脉冲表示“0”，图 6 利用短脉冲之间时间间隔方式表示“启动”和“待机”两种信息。

最适合信道传输的编码形式应该是白噪声形式，也就是码元“0”和码元“1”不应该过多相连，符合白噪声的形式。所以优化码本的第一步就是要去掉码元连续为“1”和码元连续为“0”个数较多的指令码序列。首先剔除掉这些序列，其次选取的主要准则是相关度较低，且序列的码距较大。可以采用 Gold 序列等伪随机序列的方法来生成编码序列。



(a) 290次激发波形



(b) 相关系数峰值

图 5 多次发射的气枪声源信号及相关系数

Fig.5 The correlation coefficients of multi-transmitted signals by air-gun acoustic source

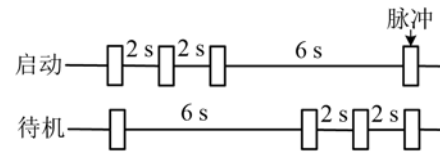


图 6 短脉冲时间调制编码

Fig.6 Short pulse time modulation coding

以四个气枪声源为例，编码时长 10 s，编码间隔为 1 s，以相关度最小，码元间距最大为最优准则挑选编码指令，控制脉冲发射时延间隔，设计指令信号集如表 1 所示。

表 1 编码指令集

Table 1 Set of coding commands

指令集	编码序列
启动	10101000001
工作模式 1	10000100101
.....
工作模式 n	10100100001
待机	10000010101

2.4 信号的检测与识别方法

发射信号经过信道传输，在接收端被接收机接收，并对其进行检测与估计，主要是确定信号在时间轴上的位置，根据事先约定的编码方式译码，解析指令信息。

气枪声源产生的水声脉冲信号经过远距离传输、海底海面反射等影响，信号畸变和多途干扰严

重，对编码脉冲信号的检测识别是该远程水声通信方法的难点。可采用逆向设计方法，针对典型水声信道建立传播模型，对脉冲宽度、脉冲编码、远距离传输的脉冲畸变进行分析。通过仿真和实际测量建立起传输信道与脉冲展宽和时延间隔的关系，以接收端可准确可靠检测识别通信信号为基本要求，反推发射端应设定的发射脉冲参数。根据实际应用情况，调整发射信号的脉冲宽度和脉冲间隔，保证接收端能够接收到一致性较好的通信信号。通信信号的检测可采用匹配滤波、双 α 滤波检测^[6-8]、相关检测和互累积量检测^[9]等方法，实现对经远距离传播后的弱脉冲信号的检测，处理框图如图 7 所示。

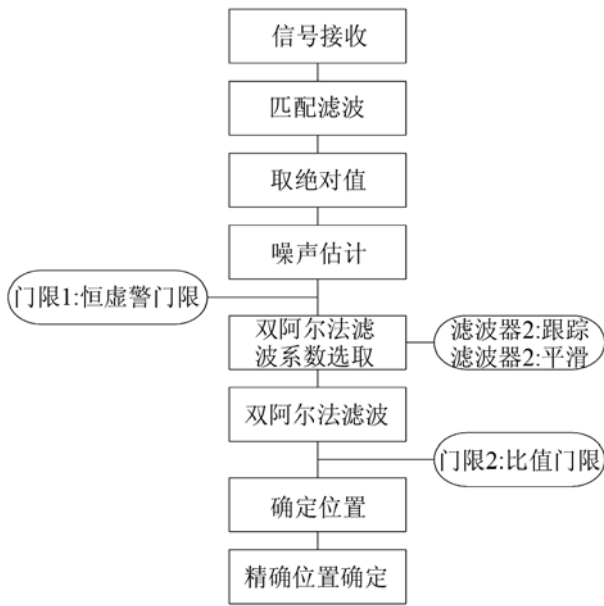


图 7 信号接收检测处理框图

Fig.7 Processing block diagram of signal reception and detection

本文研究中采用了匹配滤波与双 α 滤波相结合的检测方法。匹配滤波器就是一种在输入为确知信号加白噪声的情况下，使得到的输出信噪比最大的最佳线性滤波器，使用匹配滤波器可以有效地提高信噪比。经过匹配滤波之后的信号再采用双 α 滤波对信号进行判决，准确判断脉冲位置。此外，根据双 α 滤波器的特性，不仅可以跟踪信号还可以起到平滑作用。当 α 值趋于 0 时，主要呈现跟踪特性，当 α 值趋于 1 时，主要呈现滤波平滑作用。两个滤波器工作时分别利用它们的跟踪和平滑特性。根据信道情况设定一个合适的幅值 M 作为判决门限，当 $y_1 > My_2$ 时，判定同步信号的到来，在前后一段范围内搜索确定脉冲峰的精确位置。

通信信号识别则采用指令集匹配方法，根据通信需求，事先约定好通信信号的脉冲宽度、频率范围、脉冲间隔、脉冲个数等，建立通信指令信号集，

在接收端对接收到的声波信号进行匹配。

2.5 仿真实验

为验证本文提出的远程水声通信方法的原理，对上述方法进行了仿真分析，仿真处理流程图如图 8 所示。

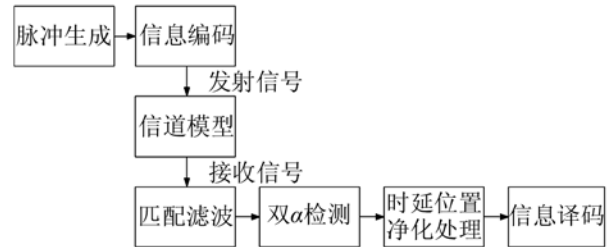


图 8 仿真处理流程图
Fig.8 Simulation flow chart

主要的仿真条件和参数设置如下：

(1) 海区条件参数

考虑到本文提出的远程水声通信方法的应用背景，设定海区深度 ≤ 200 m，等深度，海水密度为 1024 kg/m^3 ，海底密度为 1971 kg/m^3 ，海底介质声速为 1749 m/s ，海底吸声系数为 $0.37 \text{ dB}/\lambda$ ，水中声速 1500 m/s ，声速梯度分布为等声速分布、正梯度分布、负梯度分布。本文只列出等声速分布的仿真结果。

(2) 发射接收参数

气枪声源发射器深度为 10 m ，发射脉冲峰值声源级为 210 dB ；接收水听器距离海底 5 m ，通信距离为 200 km 。

(3) 气枪声源参数

气枪压力为 2000 Psi ，容积为 150 in^3 ，热力学参数为 1.13 。

生成的气枪声源脉冲仿真波形如图 9 所示。

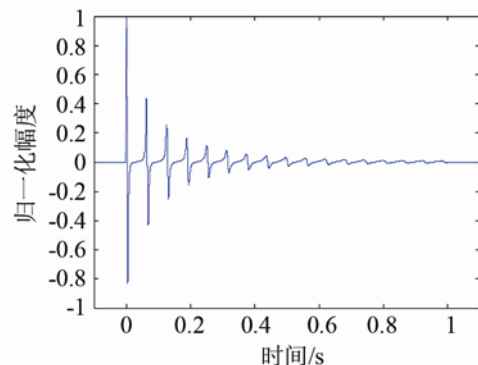


图 9 气枪声源脉冲仿真波形图

Fig.9 The simulated pulse waveforms of air-gun acoustic source

信道冲击响应和传播损失仿真如图 10、11 所示。选取通信指令序列“1010101010”，经水声信道传输衰减后的接收信号波形如图 12 所示。经匹配滤波后的波形输出如图 13 所示。

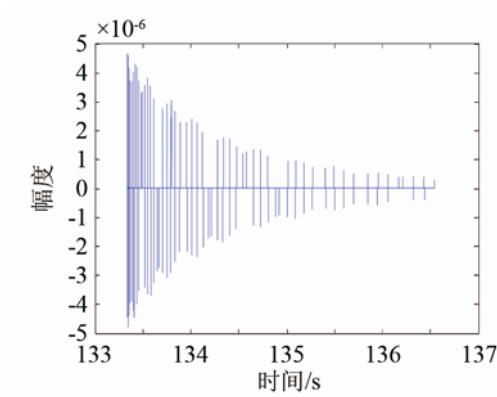


图 10 等声速分布对应的信道冲击响应
Fig.10 Channel impulse response of constant sound velocity profile

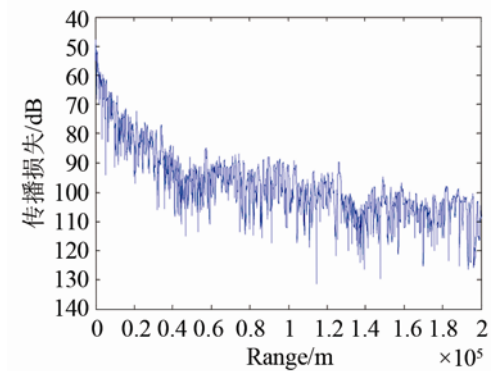


图 11 等声速分布对应的传播损失
Fig.11 Transmission loss for constant sound velocity profile

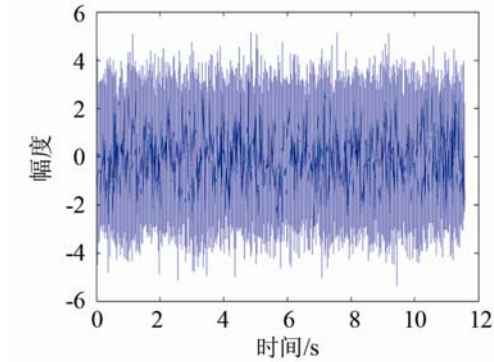


图 12 接收信号波形
Fig.12 Received signal waveform

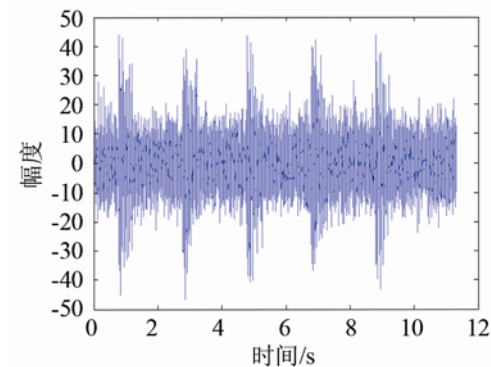


图 13 匹配滤波器输出波形
Fig.13 Waveform of matched filter output

经双 α 滤波后的波形输出如图 14 所示。经位置净化处理后，估计的脉冲时延位置如图 15 所示，由仿真估计结果可知，能准确估计出脉冲的时延信息，并与通信指令序列相匹配，验证了本文提出的远程水声通信方法在原理上是有效的。

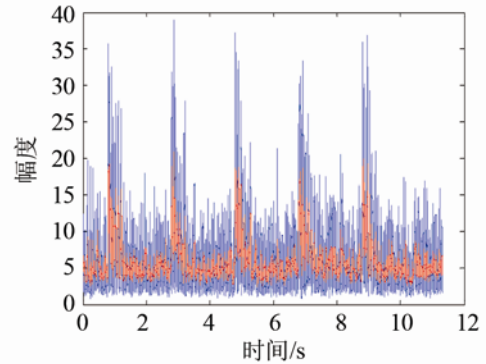


图 14 双 α 滤波器的输出波形
Fig.14 Waveform of double α filter output

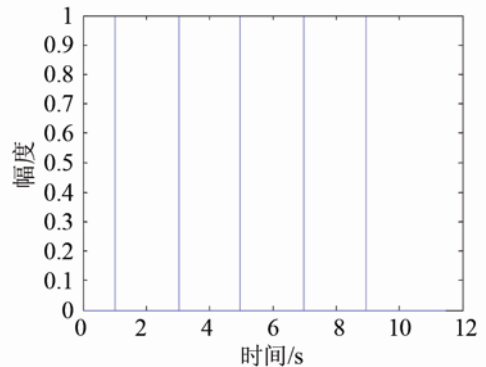


图 15 脉冲时延估计结果
Fig.15 The simulation result of pulse time delay estimation

2.6 性能优化分析

水声信号的检测和估计受接收信噪比影响较大，本文对不同接收信噪比条件下的误码率进行了仿真统计，如图 16 所示。提高接收信噪比的途径有两种，一是尽可能提高发射声源级，即合理化设计气枪声源工作参数；二是接收端采用水听器阵列

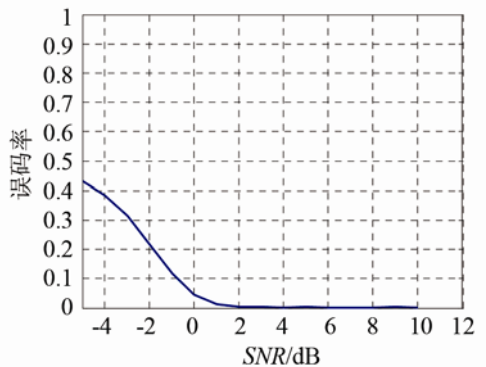


图 16 不同信噪比下的误码率曲线
Fig.16 Curve of BER versus SNR

接收,提高空间增益,具体优化措施可根据工程实现需求而定。

脉冲信号的一致性也是影响通信性能的重要因素之一,通过对不同信噪比条件下,不同脉冲信号的一致性进行误码率的统计仿真,信号一致性越高,则通信误码率越低,如图 17 所示。由前面分析可知,气枪声源产生的脉冲信号一致性在 90%以上,能够满足通信要求。

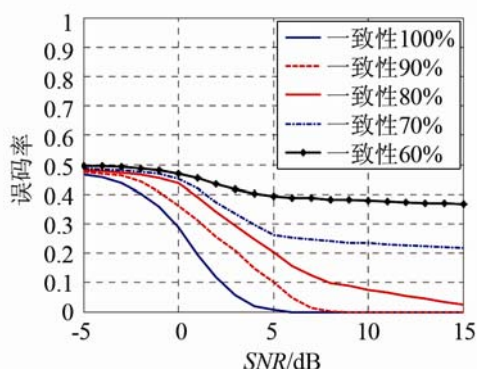


图 17 不同脉冲一致性与通信误码率的关系曲线

Fig.17 BER versus SNR for different pulse consistencies

多途对水声通信性能的影响是非常大的,并且不易消除,也是水声通信中最常见也是最难克服的一个问题。本文在研究过程中对消除多途影响的方法进行了仿真研究,增大编码间隔能有效消除多途影响,在相同信噪比、相同地形和声速分布情况下,通信误码率随着编码间隔的增大越来越小。建议编码间隔大于两倍多途时间,以此来降低或者去除多途的影响。

此外,还可通过多源组阵多次连续发射来增加信号的时域带宽积,提高匹配滤波的增益,从而提高通信的检测概率,降低通信系统的误码率,保证系统的可靠性和稳健性。

3 结 论

气枪声源产生的强声脉冲波具有声源级高、频率低、易编码等诸多优点,拥有传统换能器所不具备的性能优势,将气枪声源用于水声通信,通信距离能够满足低速率远程遥控水下作业设备的需求。本文针对具体应用情况,从脉冲编码方式、检测识别方法两方面提出了具体的技术解决途径,并进行

了仿真分析,为实现远程遥控水下作业设备提供了一种新途径,能够保障指挥船在更远的距离对水下作业设备实施有效控制。考虑到气枪声源产生的信号形式单一,编码方式有限,在实际复杂水声信道条件下的性能,还需做进一步的试验验证。

参 考 文 献

- [1] 钱慧石,丁乐俊.常用气枪声源工作原理介绍[J].物探装备,2008,18(2):94-96,108.
QIAN Huishi, DING lejun. Introduction of work principle of common airgun[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2008, 18(2): 94-96, 108.
- [2] 陈浩林,全海燕,於国平,等.气枪震源理论与技术综述(上)[J].物探装备,2008,18(4):211-217.
CHEN Haolin, QUAN Haiyan, YU Guoping, et al. Summary of airgun source theory and technology(1)[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2008, 18(4): 211-217.
- [3] 陈浩林,全海燕,於国平,等.气枪震源理论与技术综述(下)[J].物探装备,2008,18(5):300-308,312.
CHEN Haolin, QUAN Haiyan, YU Guoping, et al. Summary of airgun source theory and technology(2)[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2008, 18(5): 300-308, 312.
- [4] 陈浩林,於国平.气枪震源单枪子波计算机模拟[J].物探装备,2002,12(4):241-244.
Chen Haolin, Yu Guoping. Computer simulation for single air gun signature[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2002, 12(4): 241-244.
- [5] 唐杰.区域尺度深部探测中的人工源震源特性及信号检测研究[D].合肥:中国科学技术大学博士论文,2008:38-40.
TANG Jie. Study on active character and weak signal detection in regional scale deep exploration[D]. Hefei: A dissertation for degree of Ph.D. of University of Science and Technology of China, 2008: 38-40.
- [6] 安东尼·惠伦.噪声中信号的检测[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001:113-114.
Whalen A D. The measurement of signals with noise [M]. Harbin: Publishing House of Harbin Engineering University, 2001: 113-124.
- [7] 项楚琪,田坦.离散估计导论[M].哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1989:127-129.
XIANG Chuqi, TIAN Tan. The statement on discrete signals estimate[M]. Harbin: Publishing House of Harbin Engineering University, 1989: 127-129.
- [8] 王自娟.水声对抗若干关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学工学硕士学位论文,2010:43-44.
WANG Zijuan. Research on several key technologies of underwater acoustic counter measure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 43-44.
- [9] 赵树杰,赵建勋.信号检测与估计理论[M].北京:清华大学出版社,2005:150-157.
ZHAO Shujie, ZHAO Jianxun. Signal detection and estimation theory[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2005: 150-157.