

## 低信噪比条件下时间反转扩频水声通信研究

周跃海 李芳兰 陈楷 童峰\*

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

**摘要:** 直接序列扩频提供了一种低信噪比条件下水声通信的有效手段,但在低信噪比条件下直扩系统常用的信道均衡, rake 接收机等抑制多径干扰方法性能下降。该文结合具有突出时间、空间聚焦能力的多通道被动时间反转技术与直接序列扩频抑制低信噪比条件下多径干扰的影响,并采用卷积纠错编码进一步提高通信性能。湖试结果证明了该技术方案的有效性。

**关键词:** 水声通信; 多通道时间反转; 直接序列扩频; 卷积编码

**中图分类号:** TN929.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2012)07-1685-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2011.01410

## Research on Time Reversal Spread Spectrum Underwater Acoustic Communication under Low SNR

Zhou Yue-hai Li Fang-lan Chen Kai Tong Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) provides an effective way for underwater acoustic communication under low Signal-to-Noise Ratio (SNR). However, low SNR will deteriorate the common multi-path mitigation approaches employed in DSSS system such as channel equalizer and rake receiver. Considering that multi-channel time reversal has the ability to refocus the energy in spatial and temporal domain, multi-channel time reversal is incorporated with DSSS technology to suppress the multipath interference under low SNR, also convolutional coding is adopted to further improve the communication performance. Lake trial results show the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** Underwater acoustic communication; Multi-channel time reversal; Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS); Convolutional coding

### 1 引言

水声通信技术是当代海洋开发、海洋环境立体监测和海洋军事活动中的重要技术组成部分。而水声信道多径干扰强烈、信道响应稳定性差,具有典型的时-空-频域非平稳特性<sup>[1]</sup>,对高性能水声通信系统的设计带来很大困难。

低信噪比条件下水声通信具有发射功率低、隐蔽性好等特点,在长时间海洋环境监测等领域有广泛应用。直接序列扩频提供一种利用扩频增益在低信噪比条件下获得较好的通信性能的有效手段。针对水声信道的多径效应造成的接收信号幅度衰落、频率扩展和码间干扰等问题, rake 接收机、均衡器等技术被广泛研究。文献[2]把 rake 接收机用于扩频

水声通信系统,利用 rake 接收机减小或消除多径干扰,提高系统的通信质量。但多径分量的准确定位通常需要较高的信噪比,在低信噪比条件下多径不能完全准确分离将导致 rake 接收机的性能下降。信道均衡可以减弱甚至消除宽带通信时的多径时延带来的码间串扰,是直扩系统经常采用的抗信道衰落技术。文献[3]利用扩频技术和信道均衡技术建立了水声调制解调系统,分析不同扩频增益下信道均衡的性能;文献[4]在相干通信系统中用自适应均衡技术克服码间干扰。但是在低信噪比条件下,均衡器算法收敛性能下降,容易造成均衡器失效。

时间反转技术可以有效利用时间、空间聚焦作用抑制多径干扰,成为近年来研究的热点。文献[5]在点对点的通信系统中利用被动时间反转联合均衡来抵抗干扰,提高通信性能;文献[6]利用被动时间反转与自适应均衡相联合,在相位相干水下通信系统中,证明了此方法的可靠性与高效性;文献[7]在

2011-12-30 收到, 2012-03-16 改回

国家自然科学基金(10704063)和福建省自然科学基金(2011J01275)

资助课题

\*通信作者: 童峰 ftong@xmu.edu.cn

被动时间反转的基础上利用判决反馈均衡、锁相环技术在 MIMO 系统上实现了多用户的信息传输;文献[8]在多径信道下利用时间反转技术有效地克服码间干扰。但在低信噪比条件下,用于获取信道信息的探针信号质量下降,导致经过时间反转器处理的信号含有较多噪声干扰,将影响时间反转系统的聚焦性能。综上,目前的时间反转技术研究多集中在较高信噪比条件下,而在低信噪比下的研究应用较少。

本文提出低信噪比条件下结合多通道被动时间反转与卷积编码的扩频水声通信方案,该方法利用多通道被动时间反转技术实现空间增益和能量的聚焦,时间反转后的残余多径可通过扩频增益进行抑制,最后采用卷积编码进行纠错,进一步提高系统性能。湖试结果表明,基于多通道被动时间反转联合卷积编码的系统不仅在实现上相对简单,而且性能稳健,在低信噪比和复杂多径信道中仍然可以保证通信系统的正常工作,提高通信质量。

## 2 多通道被动时间反转扩频水声通信技术原理

### 2.1 多通道时间反转

对于多通道时间反转系统,假设第  $i$  信道的冲激响应为  $h_i(t)$ , 满足随机性, 设第  $i$  通道接收到信息码元为

$$s_{ir}(t) = s(t) \otimes h_i(t) + n_{is}(t) \quad (1)$$

式中  $n_{is}(t)$  为叠加在信息信号上的干扰噪声, 将接收到的码元信息  $s_{ir}(t)$  经过时间反转预处理器  $p_{ir}(-t)$ , 即与  $p_{ir}(-t)$  作卷积运算。

$$\begin{aligned} r_i'(t) &= s_{ir}(t) \otimes p_{ir}(-t) \\ &= s(t) \otimes h_i(t) \otimes h_i(-t) \otimes p_i(-t) + n_{ii}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $n_{ii}(t)$  为噪声干扰项,  $h_i(t) \otimes h_i(-t)$  称为时间反转信道<sup>[9]</sup>, 近似为  $\delta(t)$ 。

为了消去  $p_i(-t)$ , 将  $r_i'(t)$  与探针信号  $p_i(t)$  做卷积运算, 有

$$r_i(t) = r_i'(t) \otimes p_i(t) \approx s(t) \otimes \delta(t) \otimes \delta(t) + n_i(t) \quad (3)$$

式中  $n_i(t)$  为第  $i$  通道的噪声干扰项。

$$n_i(t) = n_{ii}(t) \otimes p_i(t) \quad (4)$$

每个通道经过各自的时间反转预处理器后信号为  $r_i(t)$ , 噪声干扰项为  $n_i(t)$ , 多通道合并后噪声干扰项为  $n'(t)$ , 信号为  $s'(t)$ , 则多通道时间反转后信号和噪声干扰项的表达式分别为

$$s'(t) = \sum_{i=1}^n r_i(t) \quad (5)$$

$$n'(t) = \sum_{i=1}^n n_i(t) \quad (6)$$

从式(1)~式(6)中可以看出, 信号  $s(t)$  经过的时间反转信道实际是信道冲激响应的自相关与探针信号的自相关的卷积。当声信道较为复杂且探针信号的自相关峰尖锐时, 该信道可以近似为时间反转信道,  $s'(t)$  可以近似为发送时的信号  $s(t)$ 。多通道信号经过各自的时间反转器后合并, 不仅对信号进行聚焦消除多径, 还原出原始信号, 而且在空间上时间上提高了信号的增益。

### 2.2 DS-DPSK 直接序列扩频基本原理

直接序列扩频 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 是用高速率的扩频序列在发射端扩展信号的频谱, 而在接收端用相同的扩频码序列进行解扩, 把展开的扩频信号还原成原来的信号。直接序列扩频方式是直接用伪噪声序列对载波进行调制, 要传送的数据信息需要经过信道编码后, 与伪噪声序列加生成复合码去调制载波。比如, 2DPSK 是利用前后相邻码元的载波相对变化传递数字信息, 解调时需要一个参考相位, 2DPSK 可以解决 PSK 中相位突变问题, 在复杂的信道中具有比较好的性能。文献[10]指出利用直接序列扩频不需要相位跟踪, 且具有较高的扩频增益, 可以适应多种信道, 保证了通信系统的稳健性。

### 2.3 卷积编码及译码

卷积编码是一种性能优越的信道编码方式, 通常它更适合前向纠错, 其性能优于分组码<sup>[11]</sup>。通常用  $(n, k, N)$  表示, 把  $k$  个信息比特编程为  $n$  个信息比特, 但  $k$  和  $n$  比较小, 特别适用串行传输信息。卷积码的译码方式一般来说有两大类, 代数译码和概率译码, 其中用得比较多的是概率译码中的维特比算法。

卷积编码不能检测和纠正长度比较大的连续错误码元, 因此需要对连续错误码元进行随机分散, 一般分散和重组连续错误码元用交织和解交织技术。

## 3 系统方案

本系统在硬件设计上, 采用 AD620 芯片搭建前置放大器对微弱的水声信号进行放大以进行下一步处理; 采用 MAX274 芯片搭建滤波器, 消除频带外的噪声, 保证接收信号的质量, 更有利于后端信号处理。

图 1 为系统的信息处理流程图。

如图, 首先把要发射的信息经过卷积编码器进行编码, 为防止信道突变而产生连续的误码, 经过卷积编码器的信息再用交织编码器进行编码, 编码后的信息用直接序列扩频方式通过换能器发射到信道。

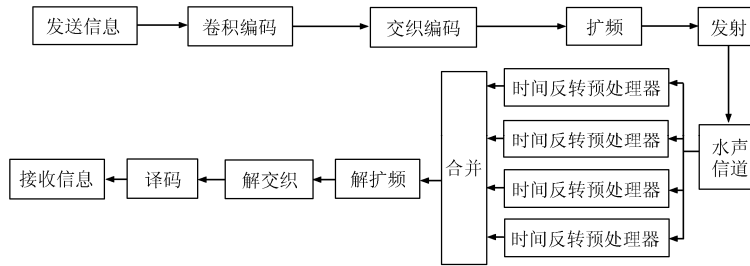


图 1 系统流程图

在接收端，其处理过程刚好和发送端的相反，从换能器接收到的信号经过放大滤波等前置处理以后，送到各通道相应的时间反转预处理器，通过同步定位把探针和信号取出并保存，把探针反转，然后与接收到的信息序列和发射探针做卷积运算，最后把时间反转后的 4 个通道的信息序列等增益合并，这样就得到了消除多径的信息序列；把这样的信息序列分别进行解扩频、解交织和卷积译码，最后还原出原始消息。

本系统采用了 DS-DBPSK 调制解调方式，采样率为 96 kHz，载波频率为 15 kHz，带宽为 13~18 kHz，采用 m 序列扩频，m 序列的长度为 63 位，码元宽度为 15.75 ms；探针信号为通过 m 序列扩频得到长度为 23.8 ms 的探针序列。通信信号的帧结构如图 2 所示：首先是同步序列用于同步探针信号和信息序列，紧接着是保护间隔，然后是探针信号，探针信号以后又是一段保护间隔，最后为信息序列。保护间隔的作用是防止多径把前后的信息序列重叠在一起。

在本文技术方案中，用了(2,1,7)卷积码，卷积码的生成多项式为(171,133)；解卷积码用维特比硬判决进行译码。同时还用了等差交织和解等差交织技术，交织深度为 7 位。

比起其他抗多径技术，本系统采用了被动时间反转结合卷积编码技术，实现简单，而且可以取得很好的结果。

### 4 实验结果与讨论

为了验证本文技术方案，进行了湖上实验。实

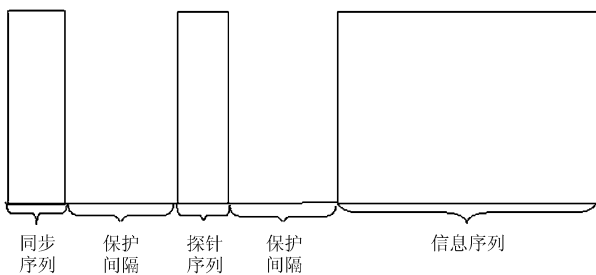


图 2 信号帧的设计

验水域平均水深约为 8 m，泥质底。图 3 显示了换能器分布示意图，图中，PS 为发射换能器，放置于离水面 3 m 处，SRA 为换能器阵列，它们垂直布放，两者之间相距 1.5 m，最上面一个换能器离水面 1 m。发射换能器和接收换能器水平距离为  $R=215$  m。设接收换能器接收信号的通道从湖面到湖底分别为通道 1，通道 2，通道 3，通道 4。

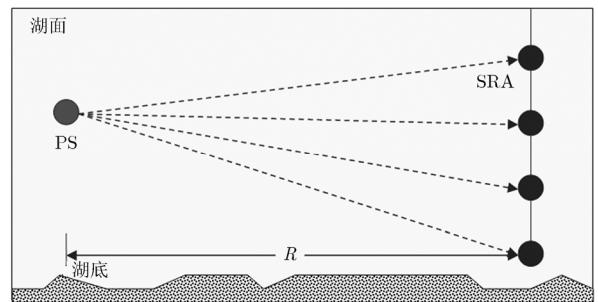


图 3 换能器分布示意图

图 4 为实验水域的声速梯度曲线。从图中可以看出，从湖面至水深 7 m 左右，声速变化很小，呈微弱负梯度；在水深 7~10 m 接近湖底处出现较明显的负梯度。

图 5 为各个通道的信道冲激响应图。图 5(a), 5(b), 5(c), 5(d), 5(e)分别为通道 1，通道 2，通道 3，

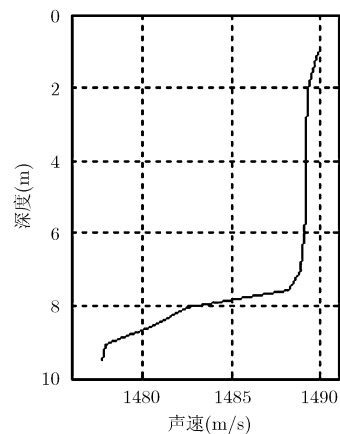


图 4 声速梯度曲线

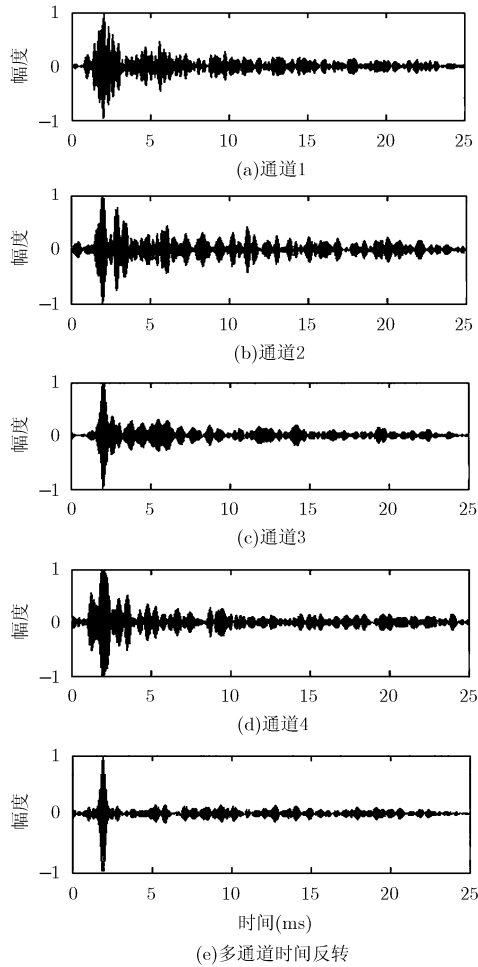


图5 各通道信道冲激响应归一化图

通道 4 和多通道时间反转后的信道冲激响应归一化图。从图 5(a), 5(b), 5(c)中可以看出, 通道 1, 通道 2, 通道 4 存在较严重的多径干扰, 在接收端接收到的信号将会有较严重的码间干扰, 通道 3 对应信道的多径干扰相对较弱; 而图 5(e)是多通道时间反转后的信道冲激响应图, 信道冲激响应的尖峰比较明

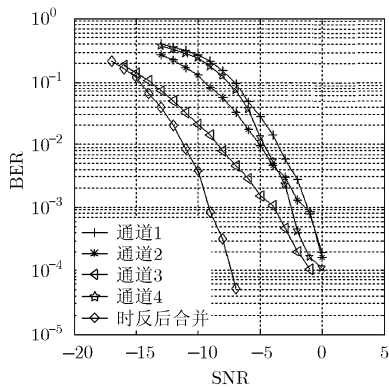
显, 多径得到了较好的抑制。图 5 表明, 多通道时间反转可以有效地利用空间及时间聚焦效应抑制多径。

为了测试低信噪比条件下的通信性能, 实验中接收信噪比设定为-17~2 dB。图 6(a)为未采用纠错编码条件下, 各通道及多通道合并原始误码率曲线的对比图, 图 6(b)为各通道卷积编码及多通道时间反转结合卷积编码后误码率曲线对比图。

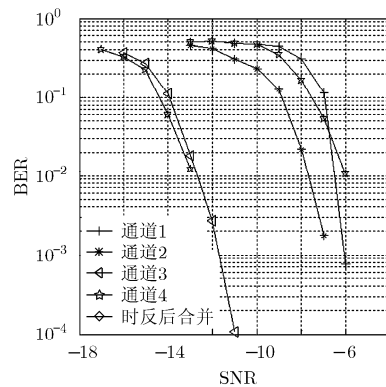
由图 6(a)可见, 在多通道合并前, 由于未采用其他多径抑制手段, 实验信道多径干扰对 DS-DBPSK 体制水声通信性能造成明显影响。由于通道 1 的信道结构复杂, 有强烈的多径干扰, 而通道 3 的多径干扰相对较弱, 因此通道 3 的误码率最低, 通道 1 的误码率最高。而采用多通道时间反转处理后, 从图 6(a)中可看出, 通信误码率有了明显下降。从图 6(a)中也可以看出, 随着信噪比下降, 时间反转处理中探针信号质量下降、携带的信道信息被背景噪声掩盖, 因此多通道时间反转获取的性能增益也呈下降趋势, 如在-14 dB, -8 dB 信噪比下体现在多通道时间反转和通道 3 的误码率分别为 0.064, 0.106, 0.000316, 0.00795。

从图 6(b)中可以看出, 与图 6(a)相比, 经过多通道时间反转结合卷积编码后, 通信误码率进一步下降。图 6 表明, 多通道时间反转在空间上和时间上对信号进行聚焦, 有效地抑制了多径干扰, 而卷积编码可以纠正由于残余多径干扰引起的突发错误。实验中多通道时间反转结合卷积纠错编码在-13 dB 信噪比条件下即可实现无误码, 进一步提高了系统在低信噪比条件下的性能。

同时, 由于纠错编码的特点, 原始误码率大于  $10^{-1}$  条件下, 结合图 6(a), 6(b)可以看出卷积编码未能取得性能增益, 甚至造成性能的恶化, 如在通道 1, 信噪比为-8 dB 条件下, 原始误码率为 0.155,



(a)编码前各通道与多通道时间反转信噪比-误码率曲线



(b)编码后各通道与多通道时间反转信噪比-误码率曲线

图6 多通道时间反转信噪比-误码率曲线

而经过卷积编码以后误码率为 0.307; 在原始误码率小于  $10^{-2}$  条件下, 多通道时间反转系统结合纠错编码后取得的性能增益对信噪比下降造成的时间反转系统探针信号质量下降不敏感, 可保持稳定的性能增益, 如信噪比在 -13 dB 以上的时候, 多通道时间反转处理后系统误码率为 0。

在低信噪比条件下, rake 接收机定位多径的性能下降甚至无法检测多径, 利用多径能量获取的性能增益将明显下降, 比如信噪比在 -8 dB 情况下, 信号被噪声严重覆盖, 在此情况下无法估计多径时延和分离多径信号; 而利用时间反转获取多径增益则不需要进行多径的检测、定位, 可较好地保证低信噪比条件下获取性能增益, 在 -8 dB 下, 经过多通道时间反转, 误码率可以达到 0。

## 5 结论

针对低信噪比、多径条件下通信系统的性能下降, 本文结合多通道时间反转、直接序列扩频和卷积编码的水声通信方法, 通过湖试实验结果表明, 低信噪比条件下多通道时间反转技术结合扩频技术可有效地抑制多径干扰, 而联合卷积编码可进一步纠正由残余多径干扰引起的突发错误。本文采用多通道时间反转扩频技术联合卷积编码充分结合多通道时间反转的时间、空间聚焦能力和扩频增益进行多径抑制, 并利用纠错编码纠正突发错误, 可显著提高低信噪比、多径条件下系统的通信质量。

## 参考文献

- [1] 陈东升, 李霞, 方世良, 等. 基于多径参数模型和混合优化的时变水声信道跟踪[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 460-463.  
Chen Dong-sheng, Li Xia, Fang Shi-liang, et al. Tracking of time-varying underwater acoustic channels based on multipath parameter model and hybrid optimization [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(3): 460-463.
- [2] 曾立, 李斌, 阎蕊. RAKE接收在水声通信中的应用[J]. 声学技术, 2003, 22(增刊 2): 232-234.  
Zeng Li, Li Bin, and Yan Rui. Application of rake receiver in underwater acoustic communication[J]. *Technical Acoustics*, 2003, 22(Suppl.2): 232-234.
- [3] 彭琴, 张刚强, 童峰. 一种基于直接序列扩频和信道均衡的水声调制解调系统[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 133-134.  
Peng Qin, Zhang Gang-qiang, and Tong Feng. Underwater acoustic modulation and demodulation system based on DSSS and adaptive channel equalization[J]. *Technical Acoustic*, 2009, 28(5): 133-134.
- [4] 和麟, 孙超. 水声相干通信信道均衡实验研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2374-2377.  
He Lin and Sun Chao. Experiment studies on coherent underwater acoustic communication equalization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(10): 2374-2377.
- [5] 陈东升, 童峰, 许肖梅. 时反联合信道均衡水声通信系统研究[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 195-197.  
Chen Dong-sheng, Tong Feng, and Xu Xiao-mei. An underwater acoustic communication system based on time-reversal and channel equalization[J]. *Technical Acoustics*, 2011, 30(3): 195-197.
- [6] 宫改云, 姚文斌, 潘翔. 被动时反与自适应均衡相联合的水声通信研究[J]. 声学技术, 2010, 29(2): 129-134.  
Gong Gai-yun, Yao Wen-bin, and Pan Xiang. A study of underwater acoustic communication based on the joint processing of passive time reversal and adaptive equalization[J]. *Technical Acoustics*, 2010, 29(2): 129-134.
- [7] Song H C, Hodgkiss W S, Kuperman W A, et al. Multiuser communications using passive time reversal[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(4): 915-926.
- [8] Edelmann G F, Akal T, Hodgkiss W S, et al. An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 602-609.
- [9] 石鑫, 刘家亮. 被动时反镜在水声通信中的应用研究[J]. 电声技术, 2010, 29(4): 63-66.  
Shi Xin and Liu Jia-liang. A study on application of passive time reversal mirror in underwater acoustic communication [J]. *Audio Engineering*, 2010, 29(4): 63-66.
- [10] 王潜, 颜国雄, 童峰. 一种浅海通信扩频水声调制解调系统及其 DSP 实现[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(4): 532-537.  
Wang Qian, Yan Guo-xiong, and Tong Feng. An underwater acoustic modulation and demodulation system based on the DSP technology[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2009, 48(4): 532-537.
- [11] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 349.  
Fan Chang-xin and Cao Li-na. *Communication Theory*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 349.

周跃海: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为水声通信。  
李芳兰: 女, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为水声通信。  
陈 楷: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为水声通信。  
童 峰: 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信。