

水声相干通信信道均衡实验研究

和麟 孙超

(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

摘要: 在水声相干通信中, 自适应均衡是克服信道码间干扰的有效方法。为了检验所设计的水声相干通信数据处理方法的正确性及作者所提出的一种变步长低计算量自适应均衡算法在实际应用中的性能, 进行了水下通信实验。对实验数据的处理结果表明, 常用的 $T_s/2$ 分数间隔均衡效果不理想, 采用 $T_s/4$ 分数间隔均衡时性能有很大提高并获得了零误码。通过与传统算法进行性能对比得出, 该算法在初始步长取值变化时具有很好的收敛性能且计算量较低, 性能优于传统算法。

关键词: 水声相干通信; 均衡算法; 分数间隔均衡

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2374-04

Experiment Studies on Coherent Underwater Acoustic Communication Equalization

He Lin Sun Chao

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Adaptive equalization is an effective way to cope with intersymbol interference caused by multipath propagation in underwater acoustic coherent communication. An experiment is carried out to verify the coherent underwater acoustic communication technique and to study the performance of adaptive equalization algorithm promoted by the author. Data processing results show that there is poor performance at $T_s/2$ fractionally spaced equalization and by using $T_s/4$ spaced equalization the data is without error. This algorithm has better performance compared with conventional equalization algorithms because it has robust convergence performance for its adaptive stepsize behavior and has low computational load.

Key words: Coherent underwater acoustic communication; Equalization algorithm; Fractionally spaced equalization

1 引言

水声信道具有复杂的时间-空间-频率变化、强多径干扰、有限频带和高噪声特性, 这是目前难度最大的无线通信信道^[1, 2]。在早期, 非相干检测方法被认为是水声通信的唯一选择。由于相位相干通信技术的频带利用率较高, 近年来, 水声相干通信技术得到了很大发展。在国外, 水声相干通信得到了大量的实验验证^[1-3]; 在我国, 水声相干通信的研究起步较晚。2003年, 在国家自然科学基金支持下, 北京邮电大学进行了水声相干通信仿真研究^[4]。目前国内水声相干通信大都处于仿真研究阶段^[5, 6], 只有中科院声学所等少数单位对这一研究方向进行了实验验证^[6, 7]。

文献[8]在对水声相干通信进行理论研究的基础上, 对其中的关键技术及所提出算法的有效性进行了仿真验证。由于水声通信的工程应用背景较强,

面对复杂的通信环境, 其关键技术的突破和发展, 需要通过实验进一步加以验证。因此本文首先对所设计的水声相干通信系统的可行性和接收数据处理算法的正确性进行实验验证。其次, 在水声相干通信中, 自适应均衡技术是克服水声信道多径效应的有效方法。文献[9]提出了一种自适应均衡算法, 本文采用该算法对接收数据进行了均衡处理, 并将该算法与水声通信常用的自适应均衡算法——最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法的性能进行了对比, 验证了该算法的优越性。

2 实验方案设计

实验水域平均深度约 4.5 m, 水底经过处理, 较平坦, 是细沙和泥土。实验的设计如图 1 所示。

发射换能器距水面 2.5 m。接收端用 7 个水听器接收信号, 最上端的 1 号水听器距水面 2 m。实验中发射船和接收船的位置不动。图 2 给出了实验系统框图。

设计信号由笔记本电脑产生并播放, 通过功率

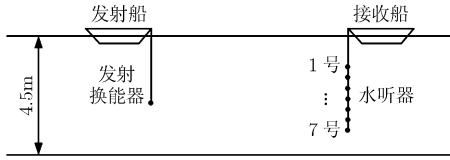


图 1 实验示意图



图 2 实验系统框图

放大器后，驱动发射换能器向水中发出声波。水听器收到信号后，经过前置放大器，最后用数据采集仪记录。示波器用来监视发射和接收到的信号。实验中首先发射一组 CW 窄脉冲串，用来测试信道的多径特性，为均衡参数的选取提供依据。然后发射 BPSK 通信信号，用来验证该相干通信系统及作者所提出的均衡算法。每一帧 BPSK 信号的前面都加入了一段 LFM 信号，通过匹配滤波进行帧同步。根据发射换能器的工作频带，将发射信号的中心频率定为 16 kHz。CW 脉冲宽度为 0.4 ms，每两个 CW 脉冲之间的间隔时间为 200 ms，5 个 CW 脉冲为一组。LFM 信号频带为 14~18 kHz，持续时间 30 ms，BPSK 信号码元速率为 2 kbaud，长度为 1000 个码元，接收信号的采样频率为 80 kHz。

3 实验结果和性能分析

我们由近及远选取多个距离进行了通信实验，受实验设备所限，最远在 100 m 距离上获得了有效数据。完成数据采集工作后，对数据在 PC 机上进行了离线处理。下面将选取通信距离为 100 m 时的实验数据为例，说明对均衡算法的验证结果。首先给出实验测得的信道特性，然后给出均衡结果，最后对不同均衡算法的结果进行分析和比较。

3.1 信道特性分析

图 3 为所有接收水听器上接收到的脉冲信号，其中最上面的信号是原发射脉冲波形。将接收波形与发射波形进行对比，可以看到接收波形被展宽，说明该水声信道存在较强的多径效应。由于 7 个水听器的深度各不相同，所以各个水听器上所收到的信号波形有些差别，其中 4 号和 5 号水听器上信号的多径反射波强度最大。另外，同一个水听器上接收到的 5 个 CW 脉冲及其反射波波形接近，表明实验信道时间稳定性较好。经该信道接收到的强度较大脉冲的持续时间约为 3 ms，此后也有一些幅度很小的反射波。

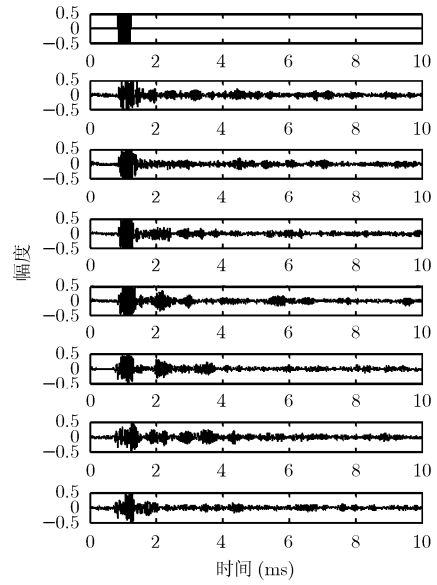


图 3 接收到的脉冲信号

3.2 均衡算法验证及比较

水声信道均衡中通常采用 LMS 算法和 RLS 算法，文献[9]提出了一种既适用于不同信道又节省计算量的 FOLMS+LMS 均衡算法。下面首先验证 FOLMS+LMS 算法的有效性，然后与 LMS 算法以及 RLS 算法的均衡结果进行对比。

3.2.1 FOLMS+LMS 算法均衡结果 采用 FOLMS+LMS 算法对 4 号水听器上的信号进行信道均衡，均方误差门限值为 -5 dB，前馈和反馈抽头个数分别为 24 和 12，初始迭代步长取值为 0.01， α 为 0.00001。采用水声相干通信均衡中常用的 $T_s/2$ 采样间隔时，均衡结果如图 4 所示。

由于信道存在多径效应，导致接收信号严重变

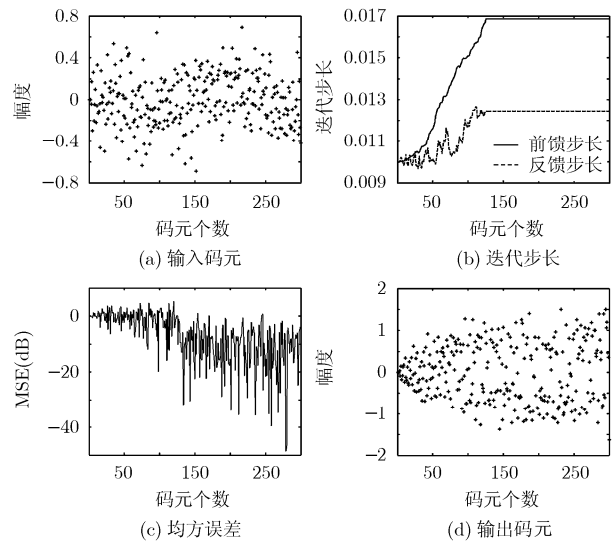
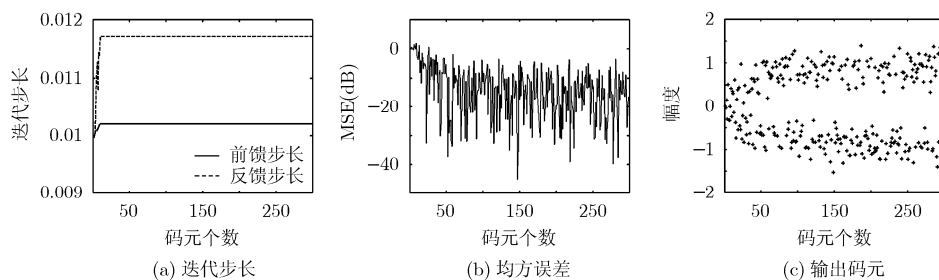


图 4 FOLMS+LMS 算法均衡结果(采样间隔 $T_s/2$)

图5 FOLMS+LMS 算法均衡结果(采样间隔 $T_s/4$)

形,接收码元(图 4(a))出现混叠,无法正确判定码元的取值。均衡开始后,根据 FOLMS 算法,迭代步长向最佳值逼近,当均方误差低于门限值后,保持迭代步长取值不变,采用 LFM 算法继续更新抽头系数。但均衡器收敛速度较慢,剩余均方误差偏大,所以输出码元仍然存在少量混叠,出现误码。数据处理结果表明,采用多通道分集均衡对均衡性能有一定程度的改善,但采样间隔的缩小,对均衡结果产生了更大的影响。当采样间隔为 $T_s/4$, 初始迭代步长为 0.01 时的均衡结果如图 5 所示。

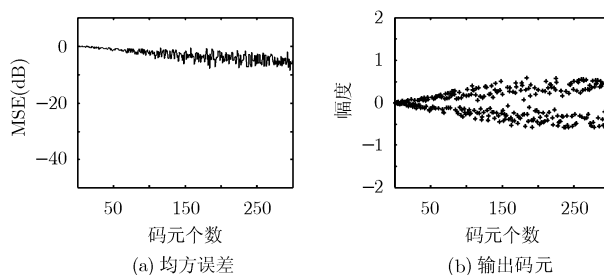
采用 $T_s/4$ 采样间隔均衡时,一方面降低了剩余均方误差,另外明显加快了均方误差收敛速度,系统接收误码率为零。以上结果一方面证明了该水声相干通信实验方法及数据处理方法的正确性,同时也表明 FOLMS+LMS 均衡算法的正确性。

我们知道,根据采样速率与码元速率的关系,可以将均衡器分为波特间隔均衡器(Baud Spaced Equalizer, BSE)和分数间隔均衡器(Fractionally Spaced Equalizer, FSE)。BSE 对接收信号以波特率进行采样,会引起频谱混叠现象。而 FSE 对接收信号以 2 倍以上波特率进行采样,可以在由波特率采样造成混叠效应之前补偿接收信号中的信道失真^[10],因此水声通信通常采用分数间隔均衡器^[1]。由于本实验信道水深很浅,因此水底、水面反射路径与直达路径之间的时间差远小于码元宽度,所以码内干扰非常严重。此时, $T_s/2$ 采样间隔均衡对该信道的补偿能力有限,需要采用更小的采样间隔进行均衡才能够获得更好的结果。在现有的水声通信实验中,文献[11]就采用了 $T_s/4$ 间隔均衡,而文献[12, 13]甚至采用 $T_s/6$ 采样间隔均衡器。因此,鉴于水声信道的复杂性,需要根据实际情况选择适当的采样间隔。

另外,从图 5(a)可以看到,在经过不到 15 个码元后,迭代步长的取值不再变化,说明算法已经由 FOLMS 转换为 LMS。由于 LMS 算法的计算量为 $2N$ (N 为均衡器的抽头系数长度), FOLMS 算法约为 $4N$, 本实验的计算量约为 $2.1N$, 相比 FOLMS 算

法降低了 48% 的工作量。当初始迭代步长取值为 0.05 和 0.001 时,采用 FOLMS+LMS 算法进行 $T_s/4$ 采样间隔均衡都获得了很好的结果,且 3 个初始步长情况下的均衡性能比较接近。因此, FOLMS+LMS 算法在迭代步长初始取值差别较大时都能够很快调整步长,保证均衡器具有较好的收敛性能,同时降低计算量。

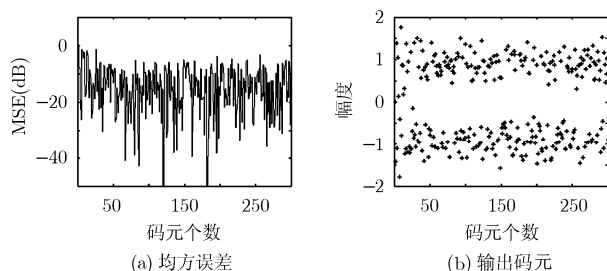
3.2.2 传统均衡算法处理结果 采用 LMS 算法,当采样间隔为 $T_s/2$ 和 $T_s/4$, 迭代步长为 0.01 和 0.05 时, LMS 算法与 FOLMS+LMS 算法的均衡结果非常接近。当迭代步长为 0.001 时, LMS 算法 $T_s/4$ 采样间隔均衡结果如图 6 所示。

图6 LMS 算法均衡结果(采样间隔 $T_s/4$)

由于迭代步长过小, LMS 算法的均方误差收敛速度远小于 FOLMS+LMS 算法,且剩余均方误差较大,误码率高达 10^{-1} 数量级。该结果进一步证明 FOLMS+LMS 算法相比固定步长 LMS 算法对步长取值的自适应能力强,因此 FOLMS+LMS 算法同时具有 LMS 算法低计算量和 FOLMS 算法自适应步长的优越性。

当采用 RLS 算法,遗忘因子 λ 取值为 0.99 时, $T_s/4$ 采样间隔均衡结果如图 7 所示。

均衡性能与 FOLMS+LMS 算法接近。当 λ 取值为 0.999, 0.98 时,均衡结果与 λ 为 0.99 时的结果相似,可见实验中 λ 的取值对 RLS 算法的性能影响较小。但是 RLS 算法的计算量约为 $10N$, 远远高于 LMS 类算法,所以即使算法收敛性能相近, FOLMS+LMS 算法在计算量方面的优势还是非常

图 7 RLS 算法均衡结果(采样间隔 $T_s/4$)

明显的。

4 结论

本文成功地进行了水声相干通信实验, 通过实验验证了本文所设计的水声相干通信系统的可行性, 并对 3 种均衡算法进行了性能分析和比较, 证明了所提算法的优越性。受条件限制, 目前我们只能在现有实验环境中针对均衡算法问题进行实验验证, 在海洋环境中进行水下通信实验是我们今后的研究方向, 本实验的成功为今后的实验研究奠定了良好的基础。另外我们还在 MIMO 均衡器在水声通信中的应用^[8]等方面进行了理论与仿真研究, 取得了一些研究成果, 这些成果的可行性也需要通过实验进一步加以验证。

参 考 文 献

- [1] Kilfoyle D B and Baggeroer A B. The state of art in underwater acoustic telemetry [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 4-27.
- [2] 蔡惠智, 刘云涛, 蔡慧等. 水声通信及其研究进展 [J]. *物理*, 2006, 35(12): 1038-1043.
Cai H Z, Liu Y T, and Cai H, *et al.*. Acoustic communication and its recent progress [J]. *Physics*, 2006, 35(12): 1038-1043.
- [3] Tao J, Zheng Y R, and Xiao C H, *et al.*. Channel estimation, equalization and phase correction for single carrier underwater acoustic communications [C]. *IEEE Oceans'08*, Kobe, Apr. 2008, 1: 1-6.
- [4] 高路, 贺志强, 田宝玉等. 高速水声通信系统仿真研究 [J]. *声学学报*, 2003, 28(1): 33-39
Gao L, He Z Q, and Tian B Y, *et al.*. Research on the simulation of high speed underwater acoustic communication systems [J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(1): 33-39.
- [5] 何成兵, 黄建国, 张涛, 阎振华. 单载波频域均衡高速水声通信仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(23): 5455-5458.
He C B, Huang J G, Zhang T, and Yan Z H. High-speed underwater acoustic communication based on single carrier with frequency domain equalization [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5455-5458.
- [6] 赵亮, 朱维庆, 朱敏. 一种用于水声相干通信系统的自适应均衡算法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(3): 648-651.
Zhao L, Zhu W Q, and Zhu M. An adaptive equalization algorithm for underwater acoustic coherent communication system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3): 648-651.
- [7] 朱维庆, 朱敏, 王军伟等. 水声高速图像传输信号处理方法 [J]. *声学学报*, 2007, 32(5): 385-397.
Zhu W Q, Zhu M, and Wang J W, *et al.*. Signal processing of high speed underwater acoustic transmission of image [J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(5): 385-397.
- [8] 李红娟. 基于信道均衡的水声相干高速率通信技术研究 [D]. [博士论文], 西北工业大学, 2008.
Li H J. Equalization based coherent high rate digital communications for underwater acoustic channels [D]. [Ph.D.dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2008.
- [9] 李红娟, 孙超. 一种适用于水声时变信道的低计算量自适应均衡算法 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(23): 5469-5472.
Li H J and Sun C. A low computational complexity adaptive equalization algorithm for time-variety underwater acoustic channels [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5469-5472.
- [10] Proakis J G 著. 张力军, 张宗橙, 郑宝玉, 等译. 数字通信 [M]. 第三版, 北京: 电子工业出版社, 2002: 427-431.
- [11] Choi Y, Kim S M, and Park J W, *et al.*. A digital acoustic transceiver for underwater communication without PLL and DLL [C]. *IEEE Oceans'03*, San Diego, CA, USA, Sep. 2003, 4(22-26): 1781-1785.
- [12] Capellano V, Loubet G, and Jourdain G. Adaptive multichannel equalizer for underwater communications [C]. *IEEE Oceans'96*, Hawaii, USA, Sep. 1996, 2: 994-999.
- [13] Stojanovic M and Zvonar Z. Multichannel processing of broad-band multiuser communication signals in shallow water acoustic channels [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1996, 21(2): 156-166.

和 麟: 女, 1973 年生, 副教授, 博士, 研究方向为信号与信息处理、数字通信等。

孙 超: 女, 1965 年生, 教授, 博士后, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、阵列信号处理、水声通信等。