

# 水下单边带语音多通道增强技术

曹文婧<sup>1,2,4</sup>, 朱 敏<sup>1,3,4</sup>, 武岩波<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国科学院声学研究所海洋声学技术中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190;  
3. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;  
4. 北京市海洋声学装备工程技术研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 船舶噪声是影响水下语音通信质量的主要因素。为了提高单边带语音信号的信噪比和语音质量, 采用多通道自适应增强算法对语音信号进行研究。该算法运用自适应信号增强技术, 具有运算量小、易实时实现、消噪效果显著等优点, 并且能够有效利用不同换能器接收到的信息。从理论上对该算法进行了分析, 并结合海试数据进行验证。结果表明, 低信噪比、非平稳噪声环境下, 该算法有效抑制了接收信号中的尖锐噪声, 并且当系统收敛时, 使其趋于白化, 明显提高了系统的输出信噪比, 显著改善了语音质量, 在性能上明显优于传统的信号相干叠加算法。

**关键词:** 水下单边带语音信号; 多通道自适应增强; 噪声抑制; 信噪比

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-05-0473-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.05.013

## Research on multi-channel signal enhancement based on SSB underwater voice communication

CAO Wen-jing<sup>1,2,4</sup>, ZHU Min<sup>1,3,4</sup>, WU Yan-bo<sup>1,3,4</sup>

(1. Ocean Acoustic Technology Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
4. Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Ship noise is the main factor that affects the quality of underwater voice communication. In order to improve the SNR and the quality of the single side band voice signal, an intensive study is made by using the multi-channel adaptive enhancement algorithm. The adaptive signal enhancement is adopted in this algorithm, which has the advantages of low computational complexity, easy real-time implementation and remarkable denoising effect. In addition, the information received by different transducers can be effectively utilized. In this paper, the algorithm is analyzed theoretically, and the simulation is carried out with the sea trial data. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively suppress the sharp noise in low SNR and non-stationary noise. And when the system is convergent, the noise tends to be whitened. Besides, the output SNR is obviously improved, the quality of voice is improved significantly, and the performance is much better than that of the traditional signal coherent superposition.

**Key words:** underwater single side band voice signal; multi-channel adaptive enhancement; noise suppression; signal noise ratio

## 0 引言

水声通信中, 水面船舶布放换能器阵用以接收潜水器发射的语音信号, 如图 1 所示。换能器在接收潜水器的发射信号、船舶噪声时, 一方面受到多途影响, 使接收到的信号具有不同程度的时延, 即接收信号包含直达信号、经过海底和海面反射后到

达的信号。另一方面, 由于船舶、海面、海水的运动, 发射信号、船舶噪声等会产生多普勒频移和多普勒扩散。这些因素导致接收信号的信噪比降低,

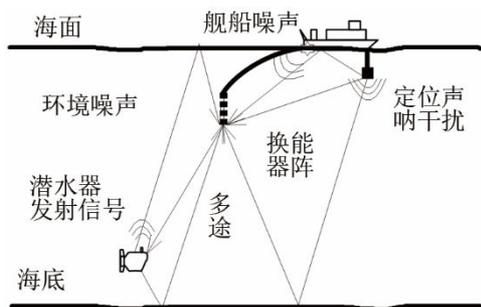


图 1 水声通信场景图

Fig.1 The scene of underwater acoustic communication

收稿日期: 2016-06-05; 修回日期: 2016-7-20

基金项目: 国家重点研发计划(2014AA09A110、2016YFC0300300); 国家自然科学基金(61471351)资助项目。

作者简介: 曹文婧(1992-), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为电子与通信工程。

通讯作者: 曹文婧, E-mail: caowenjing361@163.com

语音质量下降,通信距离缩短。因此如何抑制噪声,提高信噪比显得尤为重要。

近年来许多学者对抑制多径、船舶噪声来提高混合信号信噪比,从而得到有用信号进行了研究。文献[1]针对船舶噪声为实信号的非平稳信号的特点,基于二阶非平稳统计量对船舶噪声信号进行盲分离;文献[2]利用基阵声呐的多通道结构,实现了多通道分集与联合均衡,从而减小了多途效应引起的水声通信中的码间干扰;文献[3]将基元域声矢量自适应抵消技术与逆波束形成相结合,有效地将本舰自噪声进行干扰抵消。而对水声语音通信,从调制方式上可以分为数字通信和模拟通信,相应的处理方法和结果也不同。

数字语音通信可以使语音通信达到较高的音质、具有很强的信道匹配能力、便于加密数字化处理以及易于设备集成和小型化<sup>[4-7]</sup>。但是,在水声信道下,当误码率达到一定值后,数字通信的音质会急速下降。数字通信通过训练序列进行反馈均衡,而水声通信中单边带模拟调制是在非平稳、无训练序列条件下进行的,因此在单边带模拟调制的接收处理中无法通过训练序列来实现多通道的最佳合并。

本文针对水声通信中,在低信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)、非平稳噪声干扰情况下,从被噪声污染的信号中得到尽可能纯净的单边带调制语音信号的问题进行了研究。其中,本文算法进行噪声抑制之前并没有采用一定的方法对噪声的平稳性进行评估,也没有对噪声的平稳性进行假设,因此该算法不对噪声的平稳性进行限制。传统的载人潜水器通信系统,利用水声电话通信时,采用单通道单边带调制技术进行语音通信<sup>[8]</sup>。虽然人耳具有对声音的强大解析能力,可在较强的背景干扰情况下正确理解语意,但噪声背景给人的主观感受不佳。本文采用一种水下单边带语音多通道自适应增强技术,以抑制水声通信语音信号中的噪声,提高系统输出信噪比,改善听觉主观感受。算法所运用的自适应信号增强(Adaptive Signal Enhancer, ASE)技术具有运算量小、易实时实现、消噪效果显著等优点<sup>[9-10]</sup>,并且能够有效地利用不同换能器接收到的信息。

## 1 系统分析

### 1.1 双通道 ASE

双通道自适应信号增强算法原理结构,如图 2 所示。

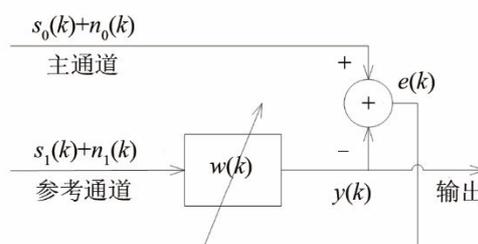


图 2 双通道 ASE 系统  
Fig.2 Dual channel ASE system

ASE 有两个输入信号:主通道输入和参考通道输入,分别为  $s_0(k)+n_0(k)$  和  $s_1(k)+n_1(k)$ 。其中,  $s_0(k)$ 、 $s_1(k)$  分别为待提取信号,对应单边带语音信号,它们的波形不一定完全相同,但具有很高的相关性。 $n_0(k)$ 、 $n_1(k)$  分别为双通道加性噪声,对应船舶噪声,彼此的相关性低于语音信号。 $s_0(k)$ 、 $s_1(k)$  与  $n_0(k)$ 、 $n_1(k)$  不相关。则系统的原理如下<sup>[9]</sup>:

系统的输出误差信号为  

$$e(k) = s_0(k) + n_0(k) - y(k)$$

均方误差为

$$\begin{aligned} \xi = E\{e^2(k)\} &= E\{[s_0(k) + n_0(k) - y(k)]^2\} = \\ &= E\{[s_0(k) - y(k)]^2\} + E\{n_0^2(k)\} + \\ &= 2E\{(s_0(k) - y(k))n_0(k)\} \end{aligned}$$

当  $y(k)$  逼近  $s_0(k)$  时,  $E\{[s_0(k) - y(k)]^2\}$ 、 $E\{[s_0(k) - y(k)]n_0(k)\}$  均取得最小值,此时,  $\xi$  取得最小值。也就是在  $\xi$  收敛到最小值时,自适应滤波器系数  $w(k)$  收敛到最佳  $w_{opt}(k)$ , ASE 的输出信号  $y(k)$  达到在均方误差(Mean-Square Error, MSE)意义上对待提取信号的最佳估计。此外,可看出混合信号中的噪声经过自适应滤波,系统趋于收敛时,输出信号中  $E\{n_0^2(k)\}$  趋于零,即该系统对输出噪声有白化作用。

### 1.2 多通道 ASE

多通道 ASE 系统如图 3 所示。

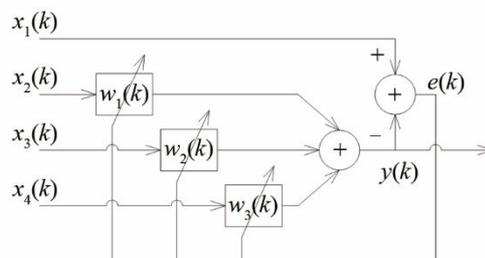


图 3 多通道 ASE 系统  
Fig.3 Multi-channel ASE system

设原始信号为  $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), \dots, s_M(k)]^T$ , 噪声为  $\mathbf{n}(k) = [n_1(k), \dots, n_M(k)]^T$ , 其中,  $M$  为换能器个数,  $s_j(k)$ 、 $n_j(k)$ , ( $1 \leq j \leq M$ ) 分别为换能器接收信号和

船舶噪声。则换能器接收到的混合信号为  $\mathbf{x}(k)=\mathbf{s}(k)+\mathbf{n}(k)$ 。

结合实际，换能器个数为 4，即  $M=4$ 。四个换能器接收信号为  $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ 、 $x_4(k)$ ，其信噪比各有不同。由于本文试验数据中的四个接收信号信噪比接近，不考虑主、参考通道的选择。 $x_1(k)$  作为主通道输入，另外三组接收信号  $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ 、 $x_4(k)$  作为参考通道输入。其原理如下：

自适应滤波器系数为

$$\mathbf{w}(k)=[\mathbf{w}_1(k), \mathbf{w}_2(k), \mathbf{w}_3(k)]^T$$

滤波器输出为

$$y(k)=\mathbf{w}_1(k)\mathbf{x}_1^T(k)+\mathbf{w}_2(k)\mathbf{x}_2^T(k)+\mathbf{w}_3(k)\mathbf{x}_3^T(k)$$

整个 ASE 系统输出误差为

$$e(k)=x_1(k)-y(k)$$

则下一时刻滤波器系数为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{w}_1(k+1) \\ \mathbf{w}_2(k+1) \\ \mathbf{w}_3(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1(k) \\ \mathbf{w}_2(k) \\ \mathbf{w}_3(k) \end{pmatrix} + \mu e(k) \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1(k) \\ \mathbf{x}_2(k) \\ \mathbf{x}_3(k) \end{pmatrix} \quad (\mu \text{ 为步长})。$$

均方误差  $\xi$  为

$$\begin{aligned} \xi &= E[e^2(k)] = E[(x_1(k)-y(k))^2] = \\ &= E[(s_1(k)+n_1(k)-y(k))^2] \\ &= E[(s_1(k)-y(k))^2] + 2E[n_1(k)(s_1(k)-y(k))] + E[n_1^2(k)] \end{aligned}$$

由于信号与噪声非相关，因此当自适应滤波器期望收敛到最佳时， $y(k)$  为信号的最佳估计， $\xi$  收敛为

$$\xi_{\min} = \min \{ E[(s_1(k)-y(k))^2] + E[n_1^2(k)] \}$$

综上所述，最小均方误差下，ASE 系统收敛时，滤波器系数  $\mathbf{w}(k)$  收敛到最佳  $\mathbf{w}_{\text{opt}}(k)$ ，系统输出信号  $y(k)$  为 MSE 意义上待提取信号的最佳估计。性能上，系统输出信噪比的提高与输入信噪比有关。一般来说，输入信噪比越大，输出信噪比改善的程度越好。此外，对 ASE 系统，各通道中待提取信号的相关性越高，系统对待提取信号的估计效果越好。

## 2 海试数据验证

输入信号为“蛟龙号”载人潜水器海试中所采集的单边带调制语音信号<sup>[8]</sup>，采样频率为 80 kHz，通信距离为 5 800 m，在仿真过程中将其混频到基带，采样频率降到 8 kHz，再将其进行归一化，然后输入到 ASE 系统。其中，仿真结果中幅度已归一化。海试试验时，信号并不是一直存在的，因此采集到的数据，有时是信号与噪声的混合信号，有时是噪声信号。低信噪比的信号是通过截取相应长度

的无信号时所采集到的噪声信号叠加到混合信号上得到。

对“蛟龙号”载人潜水器数据进行处理，双通道 ASE 系统仿真结果如图 4、5 所示。其仿真条件为：自适应滤波器参数设置为 2 901 阶，步长为  $1 \times 10^{-6}$ 。由于试验条件有限，仅采集到四个通道数据，则四通道 ASE 系统仿真结果如图 6~8 所示。其仿真条件为：自适应滤波器的参数设置为 2 901 阶，步长为  $5 \times 10^{-7}$ 。图 4 给出了换能器 2 接收信号与 ASE 系统输出信号的对比。图 5 给出了换能器 2 接收信号和系统输出信号的噪声概率累积分布。从图 4、5 中可知，双通道 ASE 系统具有抑制混合信号中的噪声、提高系统输出信噪比的效果。图 6 给出了各换能器接收信号与系统输出信号的对比情况。由图 6 可得，相对各换能器接收信号，四通道 ASE 系统输出语音信号中的噪声明显地被削弱，输出信噪比有很大提高；而且从图中可以明显地看出，尖锐的噪声通过系统后被抑制，进一步验证了该系统具有白化噪声的效果。因此本文方法优于原载人潜水器采用单通道单边带调制的方法。由图 4、图 6 对双通道、四通道 ASE 系统仿真结果进行对

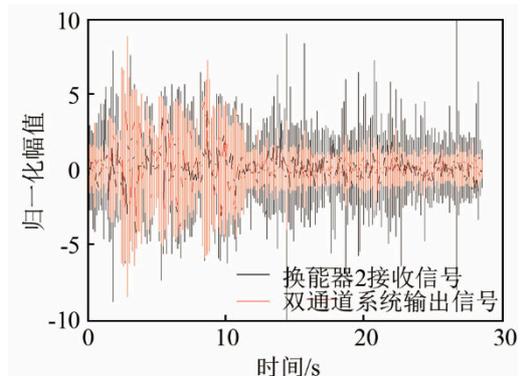


图 4 换能器 2 接收信号与系统输出信号对比图  
Fig.4 Comparison between the transducer 2 received signal and the system output signal

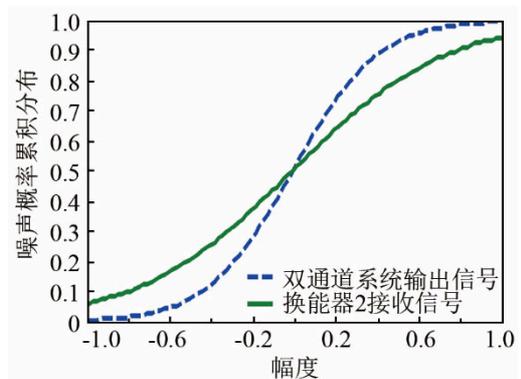
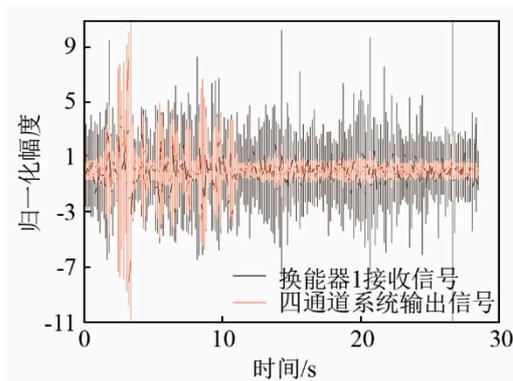
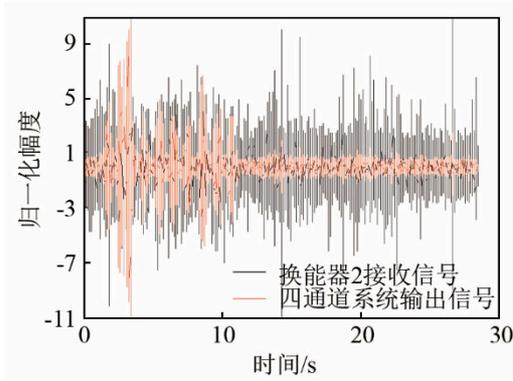


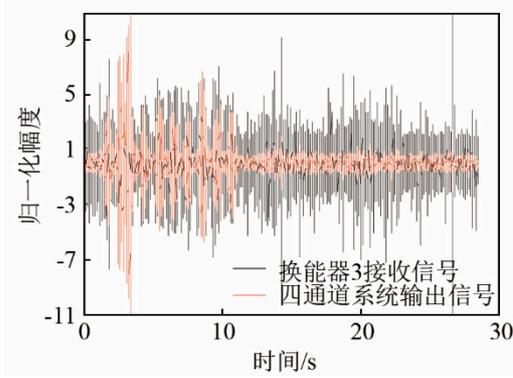
图 5 换能器 2 接收信号和系统输出信号噪声概率累积分布图  
Fig.5 Cumulative probability distribution of the noise in the transducer 2 received signal and the system output signal



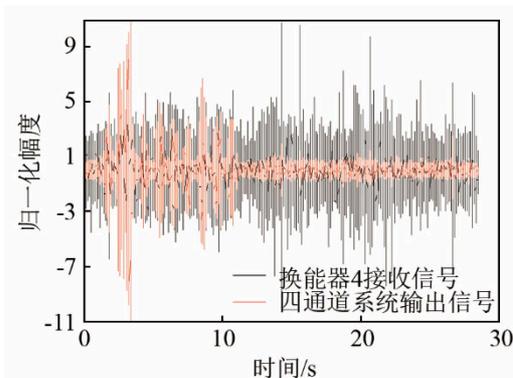
(a) 换能器 1



(b) 换能器 2



(c) 换能器 3



(d) 换能器 4

图 6 各换能器接收信号与系统输出信号对比图  
Fig.6 Comparison between each transducer received signal and system output signal

比得出，通过通道合并的四通道系统对噪声的抑制程度、信噪比的提高明显优于双通道系统。通过图 7 中的各噪声概率累积分布，进一步验证了该系统对于抑制噪声、提高输出信噪比的有效性。图 8 给出了换能器 2 与系统输出信号频谱的对比。由图 8 可得，系统具有频率选择性，即可以抑制频带外噪声。为了对水声单边带调制信号的语音质量有一个量化的评估，采用文献[11]中提出的平均主观评分 (Mean Opinion Score, MOS) 评分方法。通过不同年龄段、男女比例大致相当的人群对原始语音和经

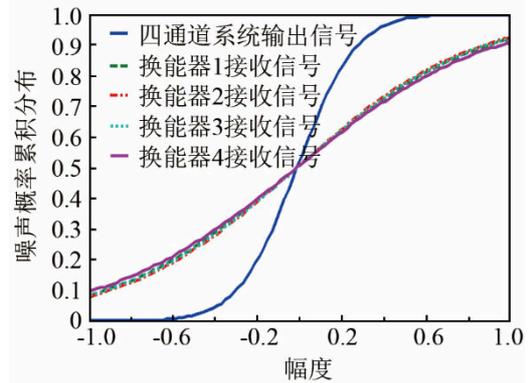
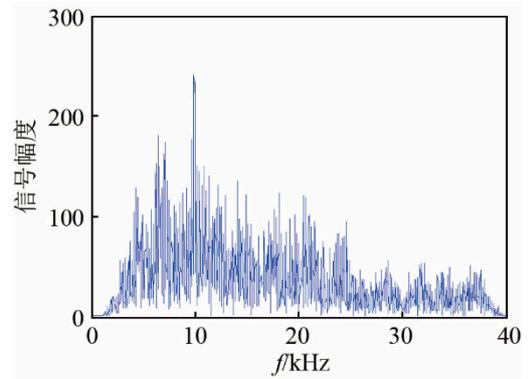
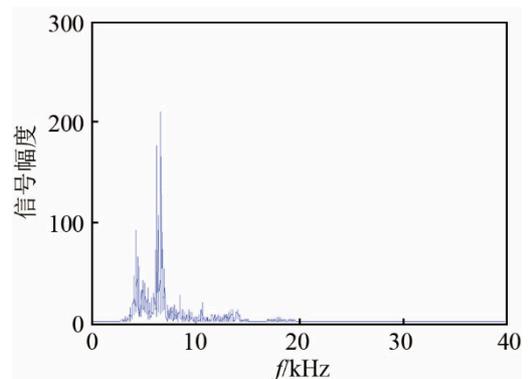


图 7 各换能器接收和系统输出信号噪声概率累积分布图  
Fig.7 Cumulative probability distributions of the noise in each transducer received signal and the system output signal



(a) 换能器 2 接收信号频谱图



(b) 系统输出信号频谱图

图 8 换能器 2 与系统输出信号频谱对比图  
Fig.8 Comparison of spectrum map between the transducer 2 received signal and the system output signal

过系统处理后的语音进行主观感觉对比,得出 MOS 分,最后求平均值。MOS 值的评分范围为 1~5,评分等级如表 1 所示。

表 1 MOS 值评分等级  
Table 1 Raking table of MOS score

| MOS 分值 | 主观意见 | 听觉感受            |
|--------|------|-----------------|
| 4~5    | 优    | 很好,听得很清楚,噪声明显减小 |
| 3~4    | 良    | 稍差,听得清楚,噪声有一定减小 |
| 2~3    | 中    | 可以,听得清楚,噪声无明显变化 |
| 1~2    | 差    | 勉强,听不太清,噪声大     |
| 1 分以下  | 劣    | 极差,听不懂,噪声大      |

不同输入信噪比下,对四通道系统的单边带语音信号进行 MOS 测评。设置信噪比(SNR)提高最多、语音质量改善最显著的一组语音 MOS 值为 5。一般情况下,输出相对输入语音听觉感受越好、听得越清楚、噪声越小,得到的 MOS 分值就越高,表明系统输出的语音质量改善越明显。表 2 给出了不同输入 SNR 信号情况下,四通道 ASE 系统输出信号信噪比的对比。算法的有效性与输入信号的信噪比有一定关系,当输入信噪比相对较高时,算法有效,当信噪比较低时,算法失效。因此,在 SNR 较低时,双通道算法失效,仿真结果不在表格中列出。其中, MOS 得分在 4~5 之间即表示系统输出语音质量显著改善;在 3~4 之间即表示语音质量有所改善;在 3 以下即表示语音质量无改善。由表 2 可看出,对于四通道系统,输入信噪比高于-4 dB 时,尖锐噪声得到了有效的抑制并趋于白化,系统输出信噪比相对输入提高了 10~13 dB,听觉效果上有显著改善,性能上明显优于四个通道进行信号相干叠加所提高的 6 dB 信噪比;输入信噪比在-7~-4 dB 之间时,系统输出信噪比相对输入提高了 6~9 dB,性能上优于相干叠加;输入信噪比低于-6 dB 时,信噪比提高小于 6 dB,性能上劣于相干叠加,听觉上没有改善。综上所述,水声通信中,低 SNR、非平稳噪声干扰下,本文方法能够很好地

表 2 不同输入 SNR 仿真结果比较  
Table 2 Comparison of simulation results under different SNR

| 四通道<br>输入 SNR/dB |      |      |      | 四通道输出<br>SNR/dB | MOS 值 |
|------------------|------|------|------|-----------------|-------|
| 6.2              | 6.0  | 6.8  | 6.3  | 19.8            | 5.0   |
| 3.1              | 4.0  | 3.8  | 2.6  | 17.3            | 4.7   |
| 0.8              | 1.8  | 1.5  | 1.0  | 14.7            | 4.7   |
| -1.1             | -0.5 | -0.3 | -1.3 | 11.9            | 4.5   |
| -5.0             | -3.9 | -4.5 | -4.0 | 5.6             | 3.4   |
| -5.4             | -4.7 | -5.4 | -6.0 | 2.7             | 3.4   |
| -6.6             | -5.7 | -5.8 | -6.0 | 1.2             | 3.1   |
| -7.1             | -6.7 | -7.2 | -6.8 | -1.1            | 2.5   |
| -8.6             | -7.3 | -7.7 | -7.9 | -3.3            | 2.1   |

从被噪声污染的信号中得到尽可能纯净的单边带调制语音信号。

### 3 收敛速度和计算复杂度

滤波器的阶数、步长等影响着系统的收敛速度。滤波器阶数越高,满足系统收敛时步长的最大值越小。步长越大,系统的收敛速度越快。结合实际海试情况,自适应滤波器的阶数选择相对较大的数值。

试验仿真采用的是语音信号,没有数字信号的绝对理想值,从而无法通过均方误差曲线来衡量方法的收敛性。为此,四通道信号增强算法中采用滤波器系数来衡量算法的收敛性,如图 9 所示。其中,每迭代 1 000 次,记录一次  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ ,选取各滤波器系数的最大值作为  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  的值。从图 9 可看出,经过约  $10 \times 1\,000$  次迭代后  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  完成收敛,可得到输出信号在 MSE 意义上语音信号的估计。

表 3 给出了双通道、四通道 ASE 算法每个采样点的计算复杂度。其中,  $N$  为自适应滤波器的抽头个数。该表格清晰地阐释了 ASE 系统,双通道、四通道每个采样点乘、加操作的次数,可看出四通道计算复杂度相对双通道稍复杂。

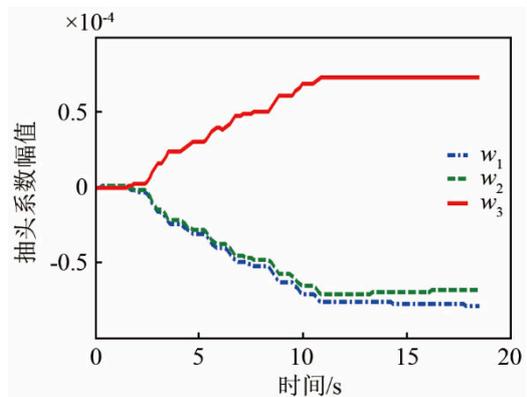


图 9 幅值收敛曲线  
Fig.9 Convergence curve of amplitude

表 3 双通道、四通道系统的计算复杂度  
Table 3 Computational complexities of dual channel and four-channel systems

|     | 每个采样点乘操作                    | 每个采样点加操作     |
|-----|-----------------------------|--------------|
| 双通道 | $2 \times N + 1$            | $2 \times N$ |
| 四通道 | $3 \times (2 \times N + 1)$ | $6 \times N$ |

### 4 结论

低 SNR、非平稳噪声下,本文采用多通道信号

增强技术解决了水下单边带语音信号信噪比低的问题。海试数据验证表明,该方法在抑制水下语音信号中的噪声、提高系统输出信噪比、改善听觉主观感受上有显著效果。

### 参 考 文 献

- [1] 单志超, 林春生, 向前. 基于二阶非平稳统计量的船舶噪声信号的盲分离[J]. 信号处理, 2009, 25(06): 973-976.  
SHAN Zhichao, LIN Chunsheng, XIANG Qian. The separation of ship noise signal based on second order non-stationary statistic[J]. Signal Processing, 2009, 25(06): 973-976.
- [2] 芮功兵. 利用声呐基阵实现多通道分集与均衡[J]. 声学技术, 2013, 32(01): 11-14.  
RUI Gongbing. Multi-channel diversity and equalization using sonar array[J]. Technical Acoustic, 2013, 32(01): 11-14.
- [3] 周伟, 惠俊英. 基于声矢量自适应干扰抵消的逆波束形成[J]. 兵工学报, 2010, 31(09): 1188-1192.  
ZHOU Wei, HUI Junying. Inverse beam-forming based on coherent interference vector adaptive canceling[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(09): 1188-1192.
- [4] 孙宗鑫, 赵天宇, 曲征, 等. 数字单边带水声语音通信研究[J]. 声学技术, 2015, 34(2): 394-396.  
SUN Zongxin, ZHAO Tianyu, QU Zheng, et al. Research of digital BBS underwater acoustic voice communication[J]. Technical Acoustic, 2015, 34(2): 394-396.
- [5] 孙大为. 数字化单边带水声语音通信系统的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
SUN Dawei. Research and implementation of digital SSB underwater acoustic voice communication system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [6] 郭中源, 陈岩, 贾宁, 等. 水下数字语音通信系统的研究和实现[J]. 声学学报, 2008, 33(05): 409-418.  
GUO Zhongyuan, CHEN Yan, JIA Ning, et al. Study and implementation of underwater digital voice communication system[J]. Acta Acustica, 2008, 33(05): 409-418.
- [7] 王艳. 数字语音编码技术及其在水声通信中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
WANG Yan. Study on digital speech coding and its application in underwater acoustic communication[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [8] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. 声学学报, 2012, 37(06): 565-573.  
ZHU Weiqing, ZHU Min, WU Yanbo, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible “Jiaolong”[J]. Acta Acustica, 2012, 37(06): 565-573.
- [9] CHEN Jiande, JOOS VANDEWALLE, WILLY SANSEN, et al. Multichannel adaptive enhancement of the electrogastrogram[J]. IEEE Transactions on Engineering, 1990, 37(3): 285-294.
- [10] 刘海龙, 唐奇伶. 神经网络预滤波的自适应运动心电信号增强器[J]. 生物医学工程学杂志, 2006, 23(05): 1118-1122.  
LIU Hailong, TANG Qiling. Adaptive exercise electrocardiographic signal enhancer with manual neural network anticipate filtering[J]. J. Biomed. Eng., 2006, 23(5): 1118-1122.
- [11] 刘玉哲. GSM网络中MOS语音质量提升方法研究[J]. 信息通信, 2012, 25(5): 197-198.  
LIU Yuzhe. Research on the improvement method of MOS voice quality in GSM network[J]. Information & Communications, 2012, 25(5): 197-198.