



研究与开发

水声通信系统中基于迭代自适应的脉冲噪声抑制方法

周桂莉, 李有明, 余明宸, 王晓丽

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对水声通信系统中脉冲噪声抑制问题, 提出了一种迭代自适应的脉冲噪声抑制方法。基于 OFDM 子载波之间的正交性, 该方法首先利用空子载波矩阵从接收信号中提取出背景噪声和脉冲噪声。然后, 利用空子载波矩阵构造导频矩阵, 得到脉冲噪声的干扰协方差矩阵, 并在加权最小二乘准则下通过对代价函数的求解得到脉冲噪声的闭式解。最后, 在接收信号中减去脉冲噪声的估计值, 完成对脉冲噪声的抑制。仿真结果表明, 本文方法有效降低了水声通信系统的误码率, 且在高信干噪比下性能提升更加明显。

关键词: 水声通信; 脉冲噪声; 迭代自适应方法

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017240

Impulsive noise mitigation based on iteration adaptive approach in underwater acoustic communication

ZHOU Guili, LI Youming, YU Mingchen, WANG Xiaoli

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Focusing on the impulsive noise mitigation in underwater acoustic communication, an impulsive noise mitigation method based on iteration adaptive approach was proposed. Firstly, by utilizing the orthogonality of the subcarriers in OFDM system, both the impulsive noise and background noise were separated from the signals. Then null tones matrix was used to construct a steering matrix and get the impulsive noise interference covariance matrix. Furthermore, a cost function based on weighted least squares approach was proposed and a close form expression for the impulsive noise was derived. Finally, the impulsive noise was mitigated by subtracting the estimation of the impulse noise in the received signal. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce the bit error rate (BER) efficiently and provide better performance, especially in high signal to impulsive noise ratio (SINR) case.

Key words: underwater acoustic communication, impulsive noise, iteration adaptive approach

收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571250); 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2015A610121); 宁波大学研究生科研创新基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation of China (No.2015A610121), The Scientific Research Foundation of Graduate School of Ningbo University

1 引言

在水声通信中,海洋环境噪声是影响水声通信系统性能的主要因素之一。海洋环境噪声主要由潮浪、地震活动、生物群体、交通运输、钻探等引起^[1]。在远海中,水声噪声一般认为是高斯分布的,但是由于在近海区域海洋工程的施工、海洋交通工具的运行及石油、天然气开采等人类活动,水声信道不仅受到高斯白噪声的影响,还受到脉冲噪声的干扰^[2]。脉冲噪声虽然持续时间短,但却具有远远高于背景噪声的能量,因此会对通信系统产生严重的影响。另外,水声信道的可用带宽非常有限,通常在几十至几百 kHz,受界面反射、声线弯曲及随机散射等影响,多径效应非常严重。由于 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 采用多载波调制,在码元中加入保护间隔来对抗多径效应,并且能将脉冲噪声的能量分散到各个子载波上,减小脉冲噪声对系统的影响,因此在水声通信系统中被广泛使用^[3]。但是当脉冲噪声的能量过大时,采用传统 OFDM 技术的接收机性能会急剧下降,因此水声通信系统中脉冲噪声的抑制方法研究引起了学者的高度重视^[4,5]。

传统的脉冲噪声抑制方法主要有消隐法和限幅法,其基本理论是通过设定门限值对接收端的时域信号进行判决,如果接收信号的幅度值超过门限值,则将其判决为受到脉冲噪声干扰的信号,并将这些被干扰信号的幅度值置零或者设定为某一固定值,完成对脉冲噪声的抑制。其中,限幅法在无线通信的脉冲噪声抑制中得到了广泛使用^[6-8],并扩展到水声通信中^[9]。参考文献[9]采用限幅法对水声通信中的脉冲噪声进行抑制,实验结果表明该方法能在一定程度上抑制较高幅度的脉冲噪声。此类方法的优点是实现简单,缺点是门限值的确定通常需要准确的脉冲噪声统计模型。考虑到脉冲噪声具有随机性特征,仅存在

于少量的采样时间点上,可以被视为时域稀疏信号。因此可以采用压缩感知理论中的信号重构算法对脉冲噪声信号进行估计,并在接收信号中减去脉冲噪声信号的估计值,完成对脉冲噪声的抑制。参考文献[10]提出了正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法,该方法通过导频子载波的观测量对脉冲噪声进行估计和抑制。但是,采用 OMP 算法对脉冲噪声进行估计需要已知脉冲噪声信号的稀疏度,在稀疏度未知或者稀疏度估计不准确的情况下,估计性能会有所下降,从而影响脉冲噪声的抑制性能。

本文提出具有高分辨率特性的迭代自适应方法估计脉冲噪声。首先,在基于 OFDM 调制技术的水声通信系统中,利用构造的空子载波矩阵从接收信号中提取出背景噪声和脉冲噪声。然后,根据空子载波矩阵构造导频矩阵,得到脉冲噪声的干扰协方差矩阵,并在加权最小二乘准则下利用代价函数的求解估计出脉冲噪声。最后,在接收信号中减去脉冲噪声的估计值,完成对脉冲噪声的抑制。与限幅法和 OMP 算法相比,该方法不需要已知脉冲噪声的统计模型和稀疏度,因此具有更好的稳健性。仿真结果表明,相比于其他脉冲噪声抑制算法,本文方法能够有效降低系统误码率。

2 系统模型

针对水声信道的频域选择特性,采用了基于 OFDM 的水声系统进行数据的传输。假设 OFDM 信号持续时间为 T ,子载波间隔为 $\Delta f = 1/T$,子载波总数 N ,空子载波数为 U ,数据子载波集合为 C_D ,空子载波集合为 C_N 。在基带上传输的信号可以表示为:

$$x(t) = \sum_{k \in C_D} s(k) e^{j2\pi\Delta f t} \quad (1)$$

其中, $s(k)$ 为加载在第 k 个子载波上的数据。

第 k 个子载波上的水声信道的频率响应可以表示为:



$$H(k) = \sum_{i=0}^{P-1} a_i e^{-j2\pi k \Delta f \tau_i} \quad (2)$$

其中, P 是信道多径数, a_i 和 τ_i 分别表示第 i 条路径信道响应的幅度和时延。

发送的数据信号经过水声信道和接收机的预处理^[10]之后到达接收端, 得到的信号为:

$$y(t) = e^{j2\pi \epsilon t} \sum_{k \in C_D} H(k) s(k) e^{j2\pi k \Delta f t} + e(t) + v(t) \quad (3)$$

其中, ϵ 为冗余多普勒频移, $e(t)$ 表示脉冲噪声, $v(t)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。将式 (3) 离散化得到:

$$y(n) = e^{j2\pi \epsilon n} \sum_{k \in C_D} H(k) s(k) e^{j2\pi k n / N} + e(n) + v(n) \quad (4)$$

因此, 信道输入输出关系用矩阵形式可以表示为:

$$\begin{aligned} y &= \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \\ &= DF^H A_H \begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(1) \\ \vdots \\ e(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{bmatrix} \\ &= DF^H A_H s + e + v \end{aligned} \quad (5)$$

其中, D 为冗余多普勒频移矩阵, $A_H = \text{diag}(H(0), H(1), \dots, H(N-1))$, $D = \text{diag}(1, e^{j2\pi \epsilon}, \dots, e^{j2\pi \epsilon(N-1)})$, F 为维数为 $N \times N$ 的离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 范德蒙德矩阵, F^H 为 F 的厄米特变换。

3 基于迭代自适应的脉冲噪声估计和抑制

首先, 利用空子载波矩阵对噪声进行提取; 然后, 采用迭代自适应方法完成脉冲噪声的估计; 最后, 在接收端减去时域噪声的估计值, 得到最终的接收信号。

在 OFDM 水声通信系统的接收端接收到信号, 并构造一个维数为 $U \times N$ 的空子载波矩阵,

记为 Φ , Φ 由 F 中的第 $(N-U)$ 行至第 N 行构成, 然后在式 (5) 两边同乘空载波矩阵 Φ , 由于 OFDM 符号中的各个子载波之间的正交性, 提取出噪声:

$$r = \Phi y = \Phi e + n \quad (6)$$

其中, $n = \Phi v$ 表示频域的背景噪声, 且依旧是高斯白噪声。

然后利用迭代自适应方法进行脉冲噪声的估计, 根据参考文献[11], $U \times N$ 的空子载波矩阵 Φ 可以作为导频矩阵:

$$\Phi = [a(\omega_1), a(\omega_2), \dots, a(\omega_N)] \quad (7)$$

$$\text{其中, } a(\omega_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{-j\omega_s}, \dots, e^{-(U-1)j\omega_s}]^T,$$

$s = 1, 2, \dots, N$ 。

令脉冲噪声向量为 $e = [\beta(1), \beta(2), \dots, \beta(N)]^H$, 则在采样点 s 处的脉冲噪声功率可以表示为 $p_s = |\beta(s)|^2$, $s = 1, 2, \dots, N$ 。由于背景噪声和脉冲噪声是相互独立的, 定义脉冲噪声的干扰协方差为:

$$C(\omega_s) = R - p_s a(\omega_s) a(\omega_s)^H \quad (8)$$

其中, R 为脉冲噪声的协方差:

$$R = \sum_{s=1}^N p_s a(\omega_s) a(\omega_s)^H$$

在加权最小二乘准则下, 通过求解如下代价函数^[12]可以得到脉冲噪声的估计值, 其代价函数可以表示为:

$$\min_{\beta(s)} [r - \beta(s) a(\omega_s)]^H C^{-1}(\omega_s) [r - \beta(s) a(\omega_s)] \quad (9)$$

求解得到对应于采样点 s 处的脉冲估计值为:

$$\hat{\beta}(s) = \frac{a(\omega_s)^H C^{-1}(\omega_s) r}{a(\omega_s)^H C^{-1}(\omega_s) a(\omega_s)} \quad (10)$$

为了避免在每个频率上计算 C^{-1} , 根据参考文献[13], 可以表示为:

$$\begin{aligned}
C^{-1} &= \left(R - a(\omega_s) p_s a(\omega_s)^H \right)^{-1} \\
&= R^{-1} + R^{-1} a(\omega_s) \left(1 - p_s a(\omega_s)^H R^{-1} a(\omega_s) \right)^{-1} \\
&\quad p_s a(\omega_s)^H R^{-1} \\
&= \left[I + \frac{p_s R^{-1} a(\omega_s) a(\omega_s)^H}{1 - p_s a(\omega_s)^H R^{-1} a(\omega_s)} \right] R^{-1}
\end{aligned} \quad (11)$$

由于 R 为非奇异矩阵, C^{-1} 又可以表示为:

$$C^{-1} = \left(I - p_s R^{-1} a(\omega_s) a(\omega_s)^H \right)^{-1} R^{-1} \quad (12)$$

联立式 (11) 和式 (12), 可以证得:

$$C^{-1} = \frac{R^{-1}}{I - p_s a(\omega_s)^H R^{-1} a(\omega_s)} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (10), 得:

$$\hat{\beta}(\omega_s) = \frac{a(\omega_s)^H R^{-1} r}{a(\omega_s)^H R^{-1} a(\omega_s)} \quad (14)$$

因此脉冲噪声在 N 个采样点上的估计值为 $e = [\hat{\beta}(1), \hat{\beta}(2), \dots, \hat{\beta}(N)]^T$, 如图 1 所示为 128 个采样点时的脉冲噪声估计值。从图 1 中可以看出, 本文的方法能准确地估计出脉冲噪声。

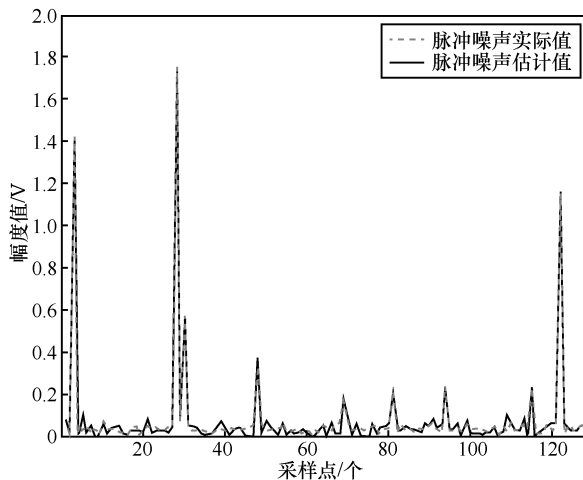


图 1 128 个采样点时的脉冲噪声估计值

4 仿真分析

为了验证算法的性能, 本文利用 MATLAB 进

行仿真。在水声通信中, 噪声 $u(n) = e(n) + v(n)$ 通常使用混合高斯模型来产生^[14], 该模型服从混合高斯分布, 由多个不同高斯分量之间的叠加, 能准确地模拟水声信道上的脉冲噪声, 其概率密度函数为:

$$f_{\text{GM}} = \sum_{i=0}^M p_i \mathcal{N}(0, \gamma_i^2) \quad (15)$$

其中, p_i 表示第 i 个高斯分量发生的概率,

$\sum_{i=0}^M p_i = 1$, γ^2 为高斯分量的方差。仿真实验中

OFDM 信号的子载波数为 128, 多径数为 5, 且每条路径的时延服从指数分布, 路径增益服从瑞利分布, 冗余多普勒频移随机产生, 取值范围为 $\left[-\frac{\Delta f}{2}, \frac{\Delta f}{2}\right]$ 。脉冲噪声模型的高斯分量个数为 3,

$p = [0.7, 0.21, 0.09]$, $\gamma^2 = [1, 10, 100]$ 。重点比较了未抑制脉冲噪声、限幅法^[9]、正交匹配追踪算法^[10]以及本文算法。为了获得比较稳定可靠的仿真结果, 该仿真结果为 5 000 次蒙特卡罗仿真取平均得到。

图 2 所示为在数据子载波数为 72 个、空子载波数为 56 个时, 分别采用 4QAM 和 16QAM 调制下, 4 种算法的误码率随 SINR 的变化情况。从图 2 中可以看出, 随着 SINR 的增加, 4 种算法的误码率均降低。在图 2 (a) 的 4QAM 调制系统中, 当 $\text{SINR} < -16$ dB 时, 限幅法的性能最好, 这是由于在低 SINR 下脉冲噪声具有较大的幅度值, 因此采用限幅法能够更好地抑制脉冲噪声分量, 保留信号分量。而本文所提算法和正交匹配追踪算法需要首先估计脉冲噪声, 而在低 SINR 条件下脉冲噪声估计的准确度下降, 从而导致误码率性能较差。而当 $\text{SINR} > -16$ dB 时, 本文所提算法能够准确估计脉冲噪声, 具有较好的误码率性能。在图 2 (b) 的 16QAM 调制系统中, 本文所提算法在 $\text{SINR} > -16$ dB 时具有最佳误码率性能。与图 2 (a) 相比, 图 2 (b) 的误码率性能有所降低, 这是因为在相同的发射能量下, 4QAM 和 16QAM 调制



的平均信号能量 E 相同。而 M QAM 调制下星座图中临近点的最小欧氏距离 $d_{\min} = \sqrt{\frac{6E_{\text{avg}}}{M-1}}$, 其中 M 为调制阶数。因此 16QAM 调制具有较小的 $d_{\min}$ 。由于 $d_{\min}$ 越小, 星座图中两点越接近, 越容易发生误判, 因此会造成误码率上升。

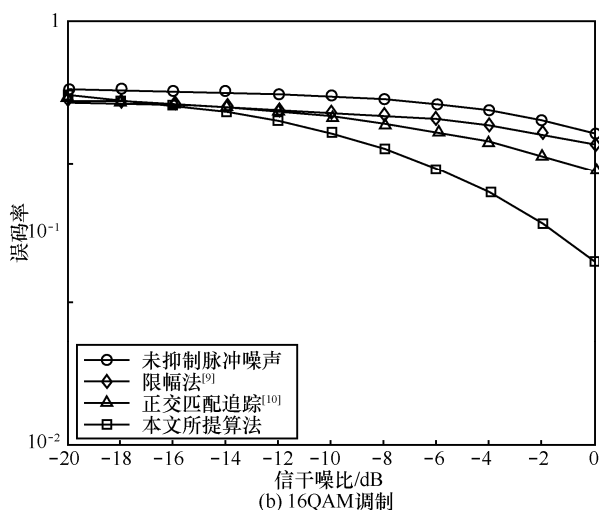
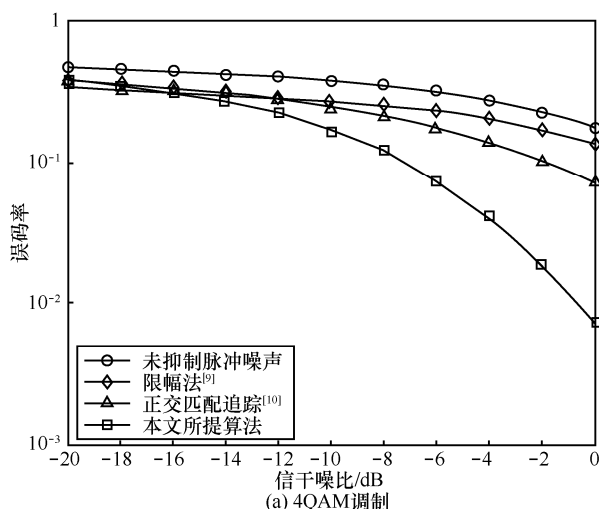


图2 不同调制模式下误码率随 SINR 的变化曲线

图3为在图2基础上进一步采用卷积码编码后4种算法误码率随 SINR 的变化情况。与图2相比, 由于采用了卷积码编码, 4种算法的误码率性能均得到了较大程度的提升。对于4QAM调制系统中, 当 $SINR < -14$ dB 时, 4种算法的误码率性能较为接近, 而当 $SINR > -14$ dB 时, 本文所提算法具有最佳的误码率性能, 且误码率随 SINR

的增加快速减小。从图3(b)可以看出, 受16QAM调制的影响, 卷积码编码对于误码率性能提升的效果不够明显。当 $SINR > -8$ dB 时, 本文所提算法的误码率性能开始优于其他算法, 并且误码率随 SINR 的增加快速减小。该组结果表明, 通过有效的信道编码技术, 可以进一步改善水声通信系统的性能。

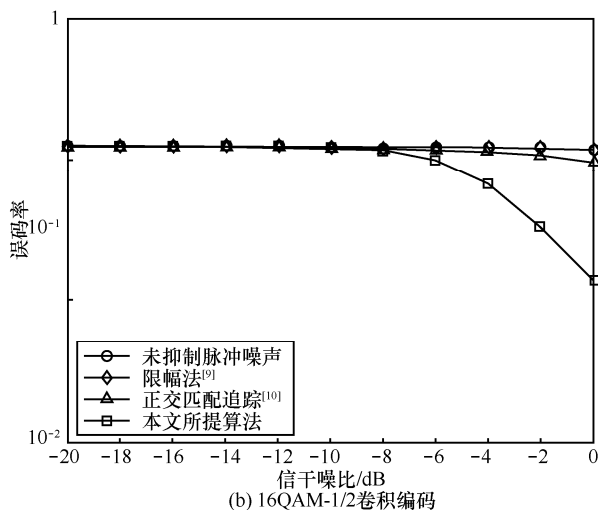
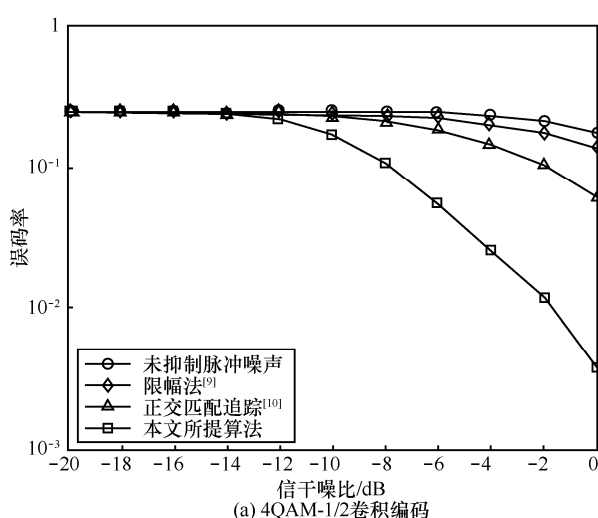


图3 1/2卷积编码下不同调制模式下误码率随 SINR 的变化曲线

图4为 $SINR = -12$ dB 时不同调制模式下的非编码系统中误码率随空子载波数的变化曲线。从图4中可以看出, 4种算法的误码率随空子载波数的增加而下降, 这是由于空子载波个数的增加使系统获得了更多的观测值, 可以更好地估计脉冲噪声。本文算法在两种调制模式均具有较小的误码率, 性能效果明显优于其他算法。

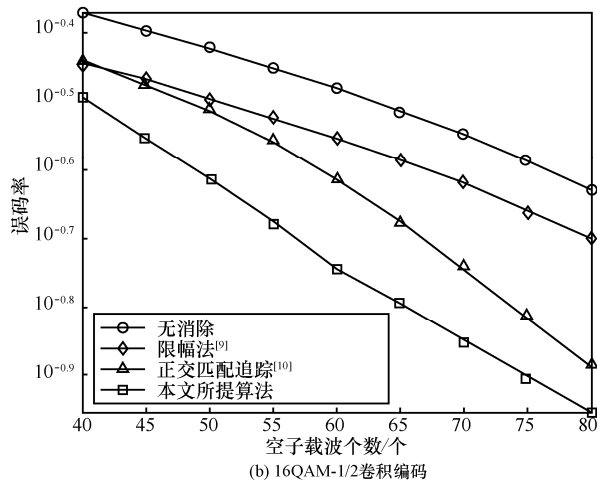
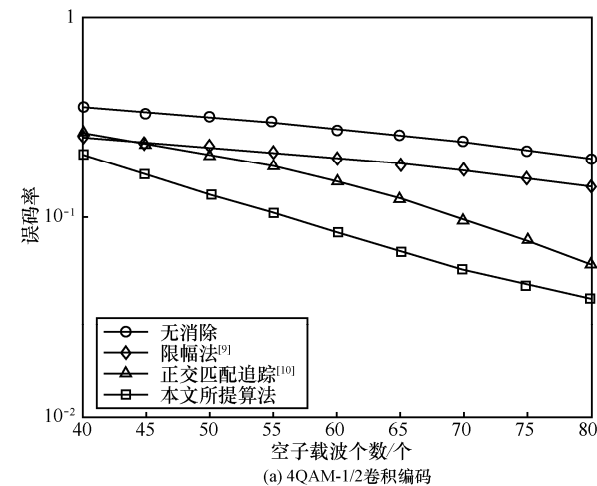


图4 $SINR=-12$ dB 时不同调制模式下的非编码系统中误码率随空子载波数的变化曲线

图5为在图4基础上采用卷积编码后误码率随空子载波数的变化曲线。从图5中可以看出,4种算法的误码率随空子载波数的增加而下降。当调制模式为4QAM时,本文算法在不同空子载波数下均具有较小的误码率,且空子载波数越大,性能提升更加明显。对于16QAM调制系统,当空子载波数较小时,本文算法利用导频矩阵提取的信息有限,不能准确提取接收信号信息,并且受16QAM的影响,误码率性能提升不明显。随着空子载波数的增加,导频矩阵可以更加准确地提取接收信号的信息,从而使得误码率性能提升。

复杂度分析^[15]: 本文所提算法的运算过程主要包括矩阵相乘和转置,其复杂度为 $O(U^3+NU^2)$;

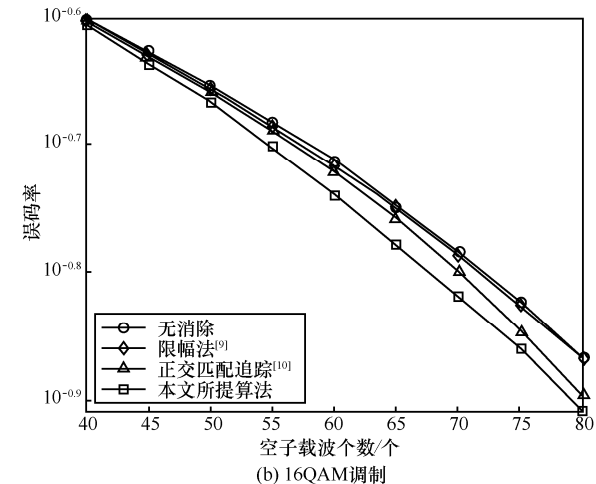
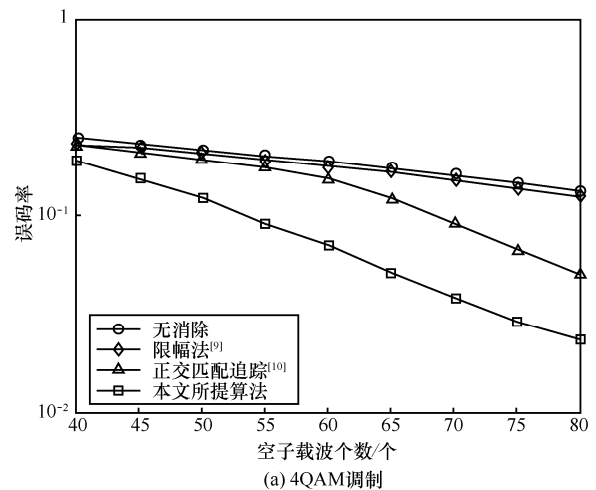


图5 1/2 卷积编码下不同调制模式下误码率随空子载波数的变化曲线

而限幅法是直接对全部采样点依次进行限幅处理,其计算复杂度为 $O(N)$;另外,正交匹配追踪算法的计算主要包括复杂度为 $O(NU)$ 的传感矩阵与残差矩阵的乘法和复杂度为 $O(N^2U)$ 的矩阵乘法。其中, N 是子载波总数, U 是空子载波数,且 $U < N$ 。

因此,限幅法具有最低的计算复杂度,但是其误码率性能最差。而本文算法和正交匹配追踪算法的计算复杂度则主要由空子载波数决定,虽然当空子载波数较大时,本文算法的计算复杂度上升,但是其系统的性能效果优于正交匹配追踪算法;而且当空子载波数较少时,本文算法不仅计算复杂度低于正交匹配追踪算法,在系统的性能提升上也优于正交匹配追踪算法。



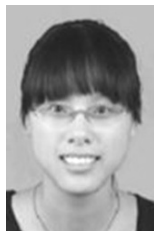
5 结束语

本文提出了一种基于迭代自适应的脉冲噪声抑制方法。该方法首先利用 OFDM 子载波之间的正交性, 从接收信号中提取出背景噪声和脉冲噪声, 然后采用具有高分辨率特性的 IAA 估计出脉冲噪声, 最后在接收端进行脉冲噪声的抑制。仿真结果表明, 本文算法有效降低了系统误码率, 在非编码和编码系统下均具有较好的性能。

参考文献:

- [1] 张歆, 张小蓊. 水声通信理论与应用[M]. 陕西: 西北工业大学出版社, 2012.
ZHANG X, ZHANG X J. Underwater acoustic communication theory and application[M]. Shanxi: Northwestern Polytechnical University Press, 2012.
- [2] 张安清. 浅海水声信道的脉冲噪声特性分析[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 988-989.
ZHANG A Q. Analysis of impulsive noise characteristic for shallow sea channel[J]. Acoustic Techniques, 2007, 26(5): 988-989.
- [3] CHEN P, RONG Y, NORDHOLM S. Pilot-subcarrier based impulsive noise mitigation for underwater acoustic OFDM systems[C]//ACM International Conference, October 24-26, 2016, Shanghai, China. New York: ACM Press, 2016: 1-5.
- [4] 郑君杰, 阮赬, 李延宾, 等. 水声通信网络问题研究[J]. 电信科学, 2009, 25(10): 63-66.
ZHENG J J, RUAN K, LI Y B, et al. Research of underwater acoustic communication network[J]. Telecommunications Science, 2009, 25(10): 63-66.
- [5] XU X K, SUN H X, ZHOU S L, et al. Impulsive noise mitigation in underwater acoustic OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 8190-8202.
- [6] 张高境, 熊兴中. 电力载波通信中的干扰特性及抑制技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(2): 182-188.
ZHANG G J, XIONG X Z. Interference characteristics and suppression techniques in power line communication[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2): 182-188.
- [7] ABDELKEFI F, DUHAMEL P, ALBERGE F. Impulsive noise cancellation in multicarrier transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(1): 94-106.
- [8] SAEEDI H, SHARIF M, MARVASTI F. Clipping noise cancellation in OFDM systems using oversampled signal reconstruction[J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(2): 73-75.
- [9] GUO Y, SUN Y, CHENG E, et al. Impulsive noise suppression and signal distortion effect mitigation in underwater acoustic OFDM system[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012(7): 181-189.
- [10] SUN H X, XU X K, MA L. Carrier frequency offset and impulsive noise estimation for underwater acoustic orthogonal frequency division multiplexing[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2014, 33(3): 289-298.
- [11] YARDIBI T, LI J, STOICA P, et al. Source localization and sensing: a nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010, 46(1): 425-443.
- [12] STOICA P, LI J, LING J. Missing data recovery via a nonparametric iterative adaptive approach[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(4): 3369-3372.
- [13] TYLAVSKY D J, SOHIE G R L. Generalization of the matrix inversion lemma[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 74(7): 1050-1052.
- [14] BANERJEE S, AGRAWAL M. On the performance of underwater communication system in noise with Gaussian Mixture statistics[C]// Twentieth National Conference on Communications, February 28-March 2, 2014, Kanpur, India. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [15] LI C G, SONG K, YANG L X. Low computational complexity design over sparse channel estimator in underwater acoustic OFDM communication system[J]. IET Communications, 2017, 11(7): 1143-1151.

[作者简介]



周桂莉 (1992-), 女, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为水声通信系统中资源分配和干扰抑制。

李有明 (1963-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。

余明宸 (1991-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为电力线通信系统脉冲干扰。

王晓丽 (1975-), 女, 宁波大学信息科学与工程学院讲师、在职博士生, 主要研究方向为多载波通信及应用。