

认知型宽带恒模阵列水声通信多用户信号分离与干扰抑制算法

王峰^{1,2} 刘蝶¹

- (1. 河海大学计算机与信息学院阵列与信息处理实验室, 南京, 211100;
2. 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: 提出了一种适用于水声通信系统节点多用户信号获取与干扰抑制的宽带空时恒模阵列算法, 实现多用户信号提取和宽带干扰的抑制。该算法与常规恒模阵列相比, 具有更强的多径与干扰抑制能力。作为认知水声通信技术的重要组成部分, 采用时频分析与瞬时自相关等调制特征提取算法, 对宽带恒模阵列获取的多用户及干扰有效分类, 从而为不同调制用户解调及干扰抑制提供解决方案。计算机仿真验证了该认知处理算法结构的良好性能。

关键词: 认知水声通信; 恒模阵列; 宽带自适应处理; 空时处理; 盲源分离

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

Source Separation and Jamming Suppression for Underwater Acoustic Communication Systems with Cognitive Capability

Wang Feng^{1,2}, Liu Die¹

- (1. Array and Information Processing Laboratory, College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing, 211100, China;
2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Ocean Information Technology of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

Abstract: A type of wide-band space-time constant modulus array algorithm for multi-user signal acquisition and interference suppression in underwater acoustic communication system is proposed to realize multi-user signal extraction and wide-band interference suppression. Compared with the conventional constant modulus array, it has stronger ability of multi-path and interference suppression. As an important part of cognitive underwater communication system, the time-frequency analysis and the instantaneous autocorrelation modulation algorithm for feature extraction provide an effective technique to classify the multi-user signals and interferences obtained by the wide-band constant modulus array, providing a solution to demodulation for different users and interference suppression. The performance of the cognitive processing structure is proved via numerical simulations.

Key words: cognitive underwater acoustic communication; constant modulus array; broad band adaptive processing; space time processing; blind source separation

引言

水下声波通信是水下可长距离无线数据传输的唯一有效技术手段^[1-2]。海洋环境监测、水下航行器和潜艇通信等诸多应用对水声通信有着强烈需求^[2-3]。因此,近些年来水下通信技术发展迅速,尤其是水声通信系统组网与应用在军事领域的价值日益凸显。自 20 世纪 90 年代,美国等国家开始开发海洋无线通信网络,先后开发了海网(Seaweb)、海鹰(Seaeagle)以及近海水下无线检测网络(PLUSnet)^[4-6]。美国的 Seaweb 网络技术已成熟,在 2004 年时,海网通信节点数增加到 40 个,采用分布式拓扑结构,节点同步、自适应功率控制等多项先进技术得以验证。由此,海网大量相关技术在潜艇通信、港口近岸侦察等领域获得大量应用。由于水声通信和 underwater 军事应用关系密切,从水声通信与水下网络发展伊始,其抗干扰性能受到重视。与无线电通信系统相类似,水下通信对抗作为水声通信系统的对立领域,可以针对水声通信网络形成强干扰,从而破坏信息传输。水声通信系统面临的常见干扰包括大功率压制噪声调制干扰与转发式干扰等^[7-8]。该类干扰均可导致水声通信系统误码率迅速上升。因此,水声通信系统必须具备强有力的抗干扰能力,以应对未来的复杂应用场景。现有水声通信系统采用码分多址(Code division multiple access, CDMA)、正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)等技术可以提高带宽有限的水声通信系统的频带利用率,多用户接入能力有所提高^[9-13],但是,仍然无法满足多用户系统兼容的需求。从系统处理能力来看,由于水声通信系统带宽窄,数据率低,不同调制类型的接入与相应数字处理具有技术可实现性。与无线电频谱利用相类似,采用认知技术可以提升水声通信频谱利用率,更好地实现多用户兼容与系统抗干扰能力^[14-18]。

因此,本文结合水声通信网络多用户兼容处理、外部有意强干扰抑制等需要,提出了一种认知型水声通信系统算法结构。该结构采用多通道多级宽带恒模阵列技术,结合时频分析、瞬时自相关算法,实现水声通信网络节点多用户信号及干扰分离,提取多用户信号及干扰调制特征,从而为不同调制的多用户信号解调提供参考。同时所提供的干扰调制特征可以为通信系统进行干扰抑制提供技术支撑。该种多级宽带恒模阵列与时频分析、瞬时自相关算法的组合技术,是认知水声通信系统的重要组成部分,可有效提升水声通信系统兼容能力与抗干扰能力。

1 认知水声通信多用户分离与调制特征提取算法

认知型水声通信系统多用户及干扰信号分离与特征提取算法原理如图 1 所示。系统采用多级宽带恒模阵列处理算法实现多用户与干扰的分离,逐个提取多用户信号与干扰信号,同时采用短时傅里叶变换与瞬时自相关算法实现用户与干扰调制形式识别。该种认知算法结构不但可以提取多用户信号,而且可以提取用户信号特征与干扰信号特征。用户信号调制特征提取与识别有助于采用正确的解调方式实现相应用户的解调,提升认知水声通信系统的兼容性,而干扰调制方式的识别有助于系统采用相应的反干扰策略实现系统抗干扰。因此,上述算法结构对认知水声通信系统具有重要的研究意义。

采用该种技术的水声通信系统可以接收工作在同一频率但

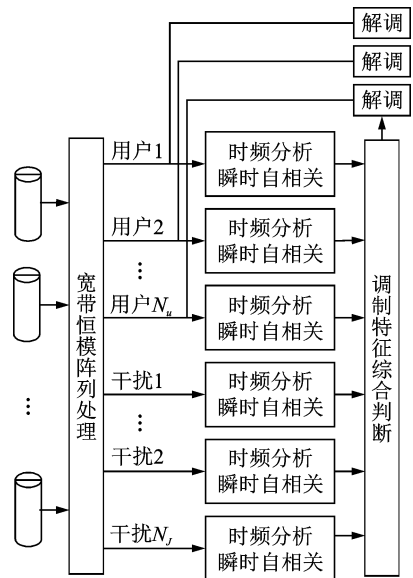


图 1 认知型水声通信系统信号分离与特征提取原理框图

Fig. 1 Principle diagram of signal separation and feature extraction in cognitive underwater acoustic communication system

调制形式不同的用户信号,同时抑制同频干扰。

1.1 多级宽带恒模阵列算法

水声通信系统工作频率较低,宽带系统是提升通信速率的关键技术。由于水声信道多途效应的影响,将造成带内频率选择性衰落。因此,本文引入宽带恒模阵列实现多用户与干扰信号分离,该算法可以实现带内衰落的有效补偿,与窄带算法相比可以获得更高的信号分离精度。宽带恒模阵列算法结构为恒模阵列波束形成器与宽带自适应对消器构成的多级结构。其基本原理是采用恒模阵列逐一提取空间的多用户与干扰信号,并采用宽带对消器对阵列通道中相应的多用户信号与干扰信号进行抑制。

恒模阵列与宽带自适应滤波组合算法原理如图 2 所示。算法基本原理在于,通过恒模代价函数的自适应处理,具有恒模特性的多用户信号与噪声调频等形式的干扰,会从恒模阵列中分离,分离后的信号会引入通道对消,采用宽带自适应对消器实现通道级干扰抑制。该算法本质上是一种盲源分离算法,要求空间多用户信号与干扰的均值为零,相互统计独立^[19]。由于空间存在多个用户及干扰,因此,需要通过多级自适应,分别实现多信号的抑制。图 2 中 FIR 表示有限冲激响应滤波器。

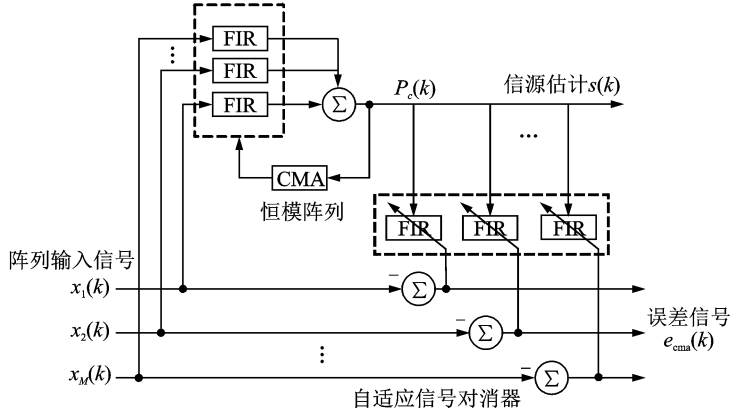


图 2 宽带恒模阵列算法原理

Fig. 2 Principle of wideband constant modulus array algorithm

设空间存在 N 个多用户与干扰信号,照射到 M 单元的均匀线阵。设 $x(k)$ 为水声通信系统阵列接收信号,则多阵列接收信号可表示成矩阵形式

$$\mathbf{X}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T \tag{1}$$

式中: k 为离散采样时刻,第 i 通道输入恒模阵列的信号为

$$x_i(k) = [x_i(k), x_i(k-1), \dots, x_i(k-N_f+1)]^T \tag{2}$$

式中: N_f 为 FIR 滤波器权向量长度。设第 i 通道的宽带恒模阵列 FIR 加权向量为

$$\mathbf{w}_i(k) = [\tau w_1, \tau w_2, \dots, \tau w_{N_f}]^T \tag{3}$$

令 $z(k)$ 为宽带恒模阵列的输出信号,恒模阵列代价函数可表示为^[20]

$$J(k) = E[||z(k)| - 1|^2] \tag{4}$$

式中: $|\cdot|$ 表示求模运算,采用最陡下降恒模算法实现权向量更新,则

$$\mathbf{y}_i(k) = \mathbf{w}_i(k) \mathbf{x}_i(k) \tag{5}$$

$$\mathbf{z}(k) = \sum_{i=1}^M \mathbf{y}_i(k) \tag{6}$$

$$\mathbf{w}_i(k+1) = \mathbf{w}_i(k) + 2\mu x_i(k) e^*(k) \tag{7}$$

$$e(k) = \frac{z(k)}{|z(k)|} - z(k) \tag{8}$$

式中:误差信号 $e(k)$ 为 $z(k)$ 的非线性变换, μ 为自适应算法迭代步长。

多级恒模阵列算法关于多级处理的原理如图 3 所示。空域恒模阵列处理与宽带自适应信号对消器相级联,每级处理针对一个源信号或者干扰信号进行分离与抑制。

假定空间存在的用户与干扰的个数为 N_j , 在自适应处理过程中, 恒模阵列第 1 级波束形成器会在其中一路用户或干扰方向形成波束指向, 同时在其他 $N_j - 1$ 路干扰方向产生零点。在下一级自适应处理过程中, 波束形成器将自适应地指向空间另一个用户, 并在其他剩余干扰方向形成零点。该级宽带对消器将对消本级指向的干扰。

当采用宽带自适应对消器实现阵列各通道信号对消时, 每个通道均包含一组 FIR 滤波器。令 $\mathbf{F}_i^m(k)$ 为第 m 级第 i 通道的宽带自适应对消算法加权, 则

$$\mathbf{F}_i^m(k) = [f_0(k), f_1(k), \dots, f_i(k), \dots, f_{N-1}(k)]^T \quad (9)$$

式中: N_c 为对消器的权向量长度。对于第 m 级对消, 第 i 通道针对干扰的自适应抑制后的信号输出可表示为

$$v_i^m(k) = x_i^m(k) - \mathbf{F}_i^m(k)z(k) \quad (10)$$

基于最小均方准则的自适应信号对消器的迭代表示为

$$\mathbf{F}_i^m(k+1) = \mathbf{F}_i^m(k) + 2\alpha v_i^m(k)z^*(k) \quad (11)$$

多级恒模阵列与宽带自适应对消结构本质上是一种盲源分离的算法结构。在该过程中, 多用户信号与干扰均得到分离, 从而完成了多用户信号提取与干扰抑制的目的。

1.2 多级恒模阵列运行级数确定方法

如果不知道空间用户与干扰数量, 则无法判断恒模阵列的分级循环次数。采用针对阵列接收信号协方差矩阵进行特征根分解的方法, 按照显著特征根的个数判断干扰的个数, 从而实现空间多用户与干扰数量的判断。为了便于判断特征根值, 当搜索到最小特征根, 采用大特征根与最小特征根进行比值的方法实现空间信号源的个数检测。第 i 个特征根比为

$$\rho_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{\min}}$$

设置门限 ρ_0 , $\rho_i > \rho_0$ 时的特征根个数, 即为空间存在信号源的个数。

1.3 输出信号调制特征提取

当采用多级恒模阵列获得了多用户信号及空间干扰信号, 则可对用户信号与干扰信号进行识别分类。分类识别通过调制特征提取得以实现。输出信号调制特征提取主要针对不同用户发射通信信号调制差异等进行识别, 对干扰的调制特征的分析有助于接收节点自适应地采用相应的抗干扰措施。该技术是认知型水声通信系统的关键技术。提出采用短时傅里叶变换与瞬时自相关两种方法进行用户调制类型分析以及干扰类型分析。信号 $x(k)$ 的短时傅里叶变换为

$$\text{STFT}_s(\tau, k) = \sum_{k=1}^{N_s} x(\tau)h^*(\tau - k)e^{-j2\pi\tau k}$$

式中: N_s 为积累的点数, τ 为时延, $h(k)$ 为窗函数。移动窗口可得到一组频谱, 它反映了信号频率随时延的变化规律。短时傅里叶变换对时频特征的提取非常有效, 对于扫频干扰、噪声调频干扰和单频信号等存在明显时频谱特征的信号可以采用提取相应时延峰值的方法实现特征判断。该算法对于相位编码信号识别存在困难, 因此引入瞬时自相关算法。

定义接收信号 $x(k)$ 的瞬时自相关为

$$B(k, \tau) = x(k) \cdot x^*(k - \tau)$$

瞬时自相关保留了相关处理的瞬时信息, 可以提取相位编码信号的码元宽度信息和相对码, 因此可

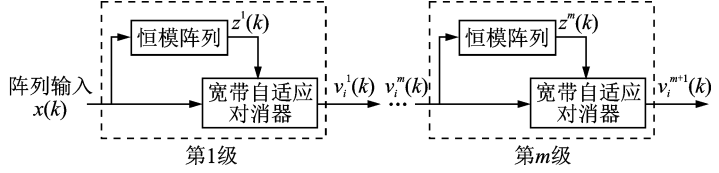


图3 多级恒模阵列多用户与干扰分离原理

Fig. 3 Separation principle of multi-user and interference in multistage constant modulus array

用于识别相位编码信号。

采用上述两种分析算法,分别提取信号时频特征与相位特征,从而实现多种调制信号与干扰的识别。采用上述两种分析算法的另一个重要原因在于,宽带恒模阵列算法输出信号的顺序存在不确定性。因此区别干扰和用户存在困难。如果要确定输出信号属于哪个用户或者是哪个干扰,需要采用上述算法进行调制形式识别。对于采用相同调制形式的用户则可考虑采用解调后用户识别码进行相应后续识别。

2 算法性能仿真

采用计算机仿真验证宽带多级恒模阵列算法与信号调制特征提取算法的性能。设某一水声通信系统接收节点存在 2 个用户与 3 个干扰。用户 1 为二相相移键控(Binary phase shift keying, BPSK)信号,用户 2 采用四相相移键控(Quadrature phase shift keying, QPSK)调制,干扰 1 为线性调频扫频干扰,干扰 2 为噪声调频干扰,干扰 3 为线性调频扫频干扰,与干扰 1 的调频斜率相反。仿真采用基带仿真,信号带宽为 10 kHz。5 种信号分别从 $[0^\circ, 30^\circ, -40^\circ, -34^\circ, 15^\circ]$ 方向照射到半波长间隔的 16 单元等距线阵。设置信噪比为 25 dB,各用户与干扰分别经过不同的信道卷积,相应的信道分别为^[21]

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1 &= [1, 0.2 + j0.3, -0.05 - j0.03]^T \\ \mathbf{h}_2 &= [1, -0.1 + j0.2, 0.02 - j0.01]^T \\ \mathbf{h}_3 &= [1, 0.12 - j0.13, -0.1 + j0.08]^T \\ \mathbf{h}_4 &= [1, 0.22 - j0.08, -0.02 - j0.05]^T \\ \mathbf{h}_5 &= [1, 0.32 - j0.17, 0.12 + j0.08]^T \end{aligned}$$

经过特征根计算,选择门限 ρ_0 为 6 dB,得出显著特征根个数为 5。因此设置恒模阵列循环处理次数为 5 次。5 次迭代过程中,各级迭代信号提取情况如图 4 所示。第 1 级析出的为 BPSK 信号,第 2 级析出的为线性调频信号,第 3 级析出的为噪声调频信号,第 4 级提取到另一线性调频干扰,第 5 级提取到 QPSK 信号。对应的信号模值收敛情况如图 5 所示。可见宽带恒模阵列算法每次迭代均可很快收敛到恒模状态。针对多途水声信道环境,宽带恒模阵列的收敛能力强于文献[21]的窄带恒模阵列。通过对比剩余均方误差比较宽带恒模阵列与文献[21]的窄带恒模阵列算法的性能。针对多途环境,宽带算法剩余均方误差可以获得 5 dB 的提高,如图 6 所示。

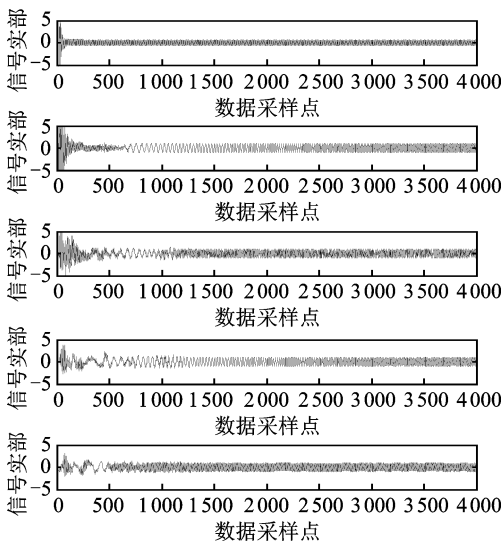


图 4 盲源分离后信号实部图

Fig. 4 Real part of signal after blind source separation

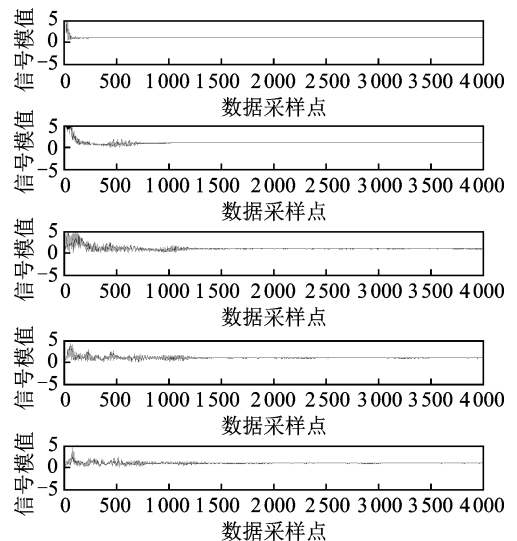


图 5 盲源分离后信号模值图

Fig. 5 Signal pattern after blind source separation

恒模阵列算法本质上是一种盲源分离算法,分离后的信号顺序存在不确定性。对于不同调制形式的多用户信号与干扰,采用短时傅里叶变换与瞬时自相关进行分类识别。采用短时傅里叶变换处理后的信号时频谱如图 7 所示。可以看出对于线性调频信号、噪声调频信号其峰值特征明确。噪声调频信号频谱峰值具有随机性,而线性调频信号时频谱峰值斜率具有线性。但是对于相位编码调制则特征不够明显。

采用时频分析峰值频率构成脊线的方差进行相位编码和调频信号的区别。线性调频信号脊线方差较小,而且通过脊线计算其调频斜率,用于不同线性调频信号的区分;噪声调频信号的斜率具有较大的方差;相位编码信号斜率的方差居中。所以可以通过斜率方差的门限设置区分不同信号。方差小于 5 个频点归类为线性调频信号,大于 20 个频点为噪声调频信号,大于 5 个频点小于 20 个频点为相位编码信号。信号类型的准确判断要综合时频分析的结果和瞬时自相关的双重特征来提高判断的准确率。

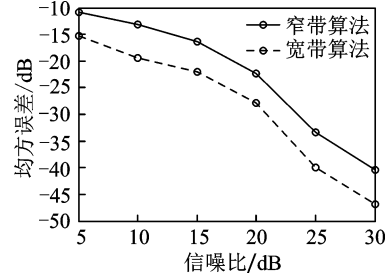


图 6 宽带与窄带恒模阵列算法在不同信噪比的剩余均方误差对比

Fig. 6 Comparison of residual mean square error between wideband and narrowband constant modulus array algorithms at different signal-to-noise ratios

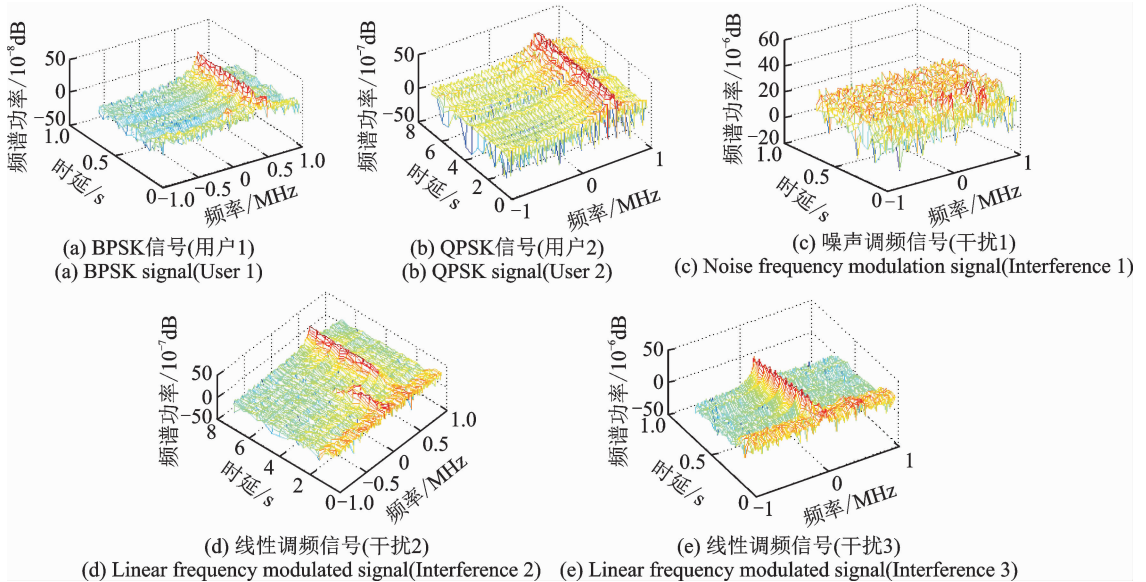


图 7 盲源分离后信号时频谱

Fig. 7 Signal time-frequency map after blind source separation

采用瞬时自相关对恒模阵列的输出信号进行分析(如图 8 所示),由图 8(a, b)可见, BPSK 调制信号的瞬时自相关具有两种相位离散值,而 QPSK 调制信号大于两种。噪声调频信号的瞬时自相关输出具有随机性。线性调频信号的瞬时自相关是单频信号。瞬时自相关提取两种特征进行信号区分,一是量化相位的个数,二是过零次数。如果量化相位个数为 2 即为 BPSK 信号,量化相位个数在 3 和 4 之间即为 QPSK 信号,大于 4 则认为是噪声调频信号。过零次数用来进一步区分噪声调频信号和线性调频信号,过零次数小于 20 为线性调频信号。

对于本仿真所采用的两种不同调频斜率的线性调频信号,瞬时自相关无法区分。但是采用短时傅里叶变换的时频谱的峰值特征可以进行区分。可见,短时傅里叶变换与瞬时自相关处理配合使用,可以

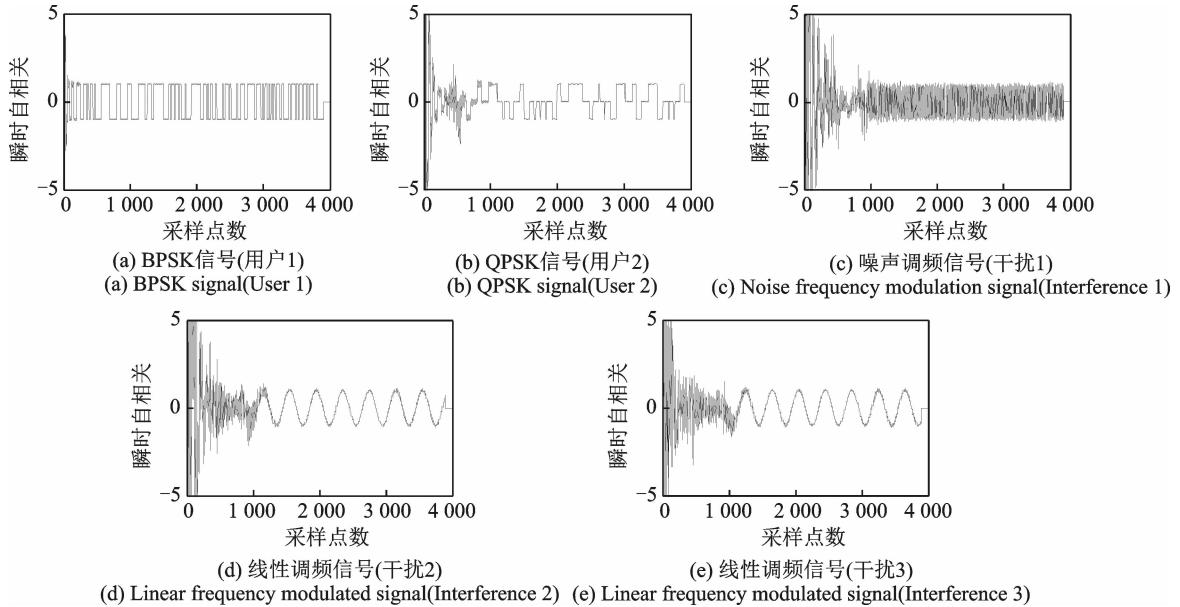


图8 盲源分离后信号瞬时自相关

Fig. 8 Instantaneous autocorrelation of signals after blind source separation

实现较为全面的调制特征提取。

对于用户信号而言,当采用了上述算法识别调制类型之后,即可调用对应的解调方式。识别干扰类型同样更有助于认知水声通信系统使用相应的抗干扰手段进行干扰对抗与抑制。采用1 000次蒙特卡洛仿真验证不同信噪比下的识别率,如图9所示。当信噪比高于15 dB时,可以取得大于90%的正确识别率。而当信噪比大于25 dB时,可以取得大于99%的正确识别概率,因此该方法展现了良好的工程应用前景。

3 结束语

本文采用宽带恒模阵列实现多用户水声通信信号分离,并实现干扰的抑制,同时采用时频分析与瞬时自相关等算法实现调制特征提取,为认知型水声通信系统提供了一种典型的处理算法架构。该处理架构适用于干扰环境中多种调制并存的多用户水声通信网络,计算机仿真验证了算法的良好性能。

参考文献:

- [1] 贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述[J]. 物理, 2014, 43(10):650-657.
Jia Ning, Huang Jianchun. An overview of underwater acoustic communications[J]. Physics, 2014, 43(10):650-657.
- [2] 袁飞, 陈炜玲, 李晔, 等. 水声语音通信体验质量的实时测量方法[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(2):307-314.
Yuan Fei, Chen Weiling, Li Ye, et al. Real-time measurement for experience quality of underwater acoustic voice communication[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(2):307-314.
- [3] Walree P A V. Propagation and scattering effects in underwater acoustic communication channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(4):614-631.
- [4] Ebihara T, Mizutani K. Underwater acoustic communication with an orthogonal signal division multiplexing scheme in doubly spread channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1):47-58.
- [5] Abdelkareem A E, Sharif B S, Tsimenidis C C. Adaptive time varying doppler shift compensation algorithm for OFDM-

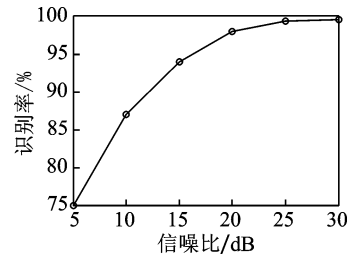


图9 不同信噪比下的调制形式识别概率

Fig. 9 Recognition probability of modulation form with different signal-to-noise ratios

based underwater acoustic communication systems[J]. *AD Hoc Networks*, 2016, 45(C):104-119.

- [6] Hwang C H, Kim K M. Doppler frequency estimation for time-varying underwater acoustic communication channel[J]. *Journal of Korean Institute of Communications & Information Sciences*, 2015, 40(1):187-192.
- [7] Lin C F, Chang S H, Lee C C, et al. Underwater acoustic multimedia communication based on mimo-OFDM[J]. *Wireless Personal Communications An International Journal*, 2013, 71(2):1231-1245.
- [8] Wang C, Yin J, Huang D, et al. Experimental demonstration of differential OFDM underwater acoustic communication with acoustic vector sensor[J]. *Applied Acoustics*, 2015, 91(91):1-5.
- [9] Radosevic A, Ahmed R, Duman T M, et al. Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(2):357-370.
- [10] Yang T C. Spatially multiplexed CDMA multiuser underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(1):217-231.
- [11] 姚晖, 吴瑛. 宽带波束空间恒模阵列[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(2):266-268.
Yao Hui, Wu Ying. Broadband beamspace constant modulus array[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(2):266-268.
- [12] 王鼎, 张刚, 沈彩耀, 等. 一种针对恒模信号的运动单站直接定位算法[J]. *航空学报*, 2016, 37(5):1622-1633.
Wang Ding, Zhang Gang, Shen Caiyao, et al. A direct position determination algorithm for constant modulus signals with single moving observer[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(5):1622-1633.
- [13] Qu F, Wang Z, Yang L, et al. A journey toward modeling and resolving doppler in underwater acoustic communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(2):49-55.
- [14] Ebihara T, Leus G. Doppler-resilient orthogonal signal-division multiplexing for underwater acoustic communication[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 41(2):408-427.
- [15] Amar A, Avrashi G, Stojanovic M. Low complexity residual doppler shift estimation for underwater acoustic multicarrier communication[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016(99):1-1.
- [16] Qarabaqi P, Stojanovic M. Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4):701-717.
- [17] Abdelkareem A E, Sharif B S, Tsimenidis C C. Adaptive time varying doppler shift compensation algorithm for OFDM-based underwater acoustic communication systems[J]. *AD Hoc Networks*, 2016, 45(C):104-119.
- [18] Zhang L, Liu W, Langley R J. A class of constant modulus algorithms for uniform linear arrays with a conjugate symmetric constraint[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(9):2760-2765.
- [19] Wang L, Lamare R C D, Yukawa M. Adaptive reduced-rank constrained constant modulus algorithms based on joint iterative optimization of filters for beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6):2983-2997.
- [20] Suk-Seung H, Shynk J J. Multicomponent receiver architectures for GPS interference suppression[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2):489-5024.
- [21] 王峰, 赵俊渭, 李洪升. 一种混合常数模水声信道盲均衡新算法的研究[J]. *声学学报*, 2003, 28(2):137-140.
Wang Feng, Zhao Junwei, Li Hongsheng. Blind equalization of underwater acoustic channel using a kind of combined constant modulus algorithms[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(2):137-140.

作者简介:



王峰(1976-),男,研究员,研究方向:阵列信号处理技术,E-mail: fengwangcci@hhu.edu.cn.



刘蝶(1994-),女,硕士研究生,研究方向:通信信号处理,E-mail:874141507@qq.com.

