

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201207004

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130515.0944.012.html>

采用 ICA 的公共信道多干扰源信号的自动识别方法

张鹏伟

(陕西科技大学 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:为解决公共信道中多个干扰信号自动识别的问题,提出了采用独立分量分析(ICA)的多干扰源盲信号分离技术.该方法先对混合的干扰信号进行分离,然后对每路信号和干扰在时域、频域和高阶累积域进行特征提取和自动识别.以 4 种干扰信号和 2 种通信信号公共信道混合为例进行了仿真实验,仿真结果中该方法迭代 5 次达到收敛,收敛时的性能指数为 0.21,说明信号分离效果较好.当信噪比高于 10 dB 时,正确分离率达到 95% 以上;当信噪比低于 10 dB 时,分离率变化不大而识别率大大下降,由此表明了该方法的正确性和有效性.

关键词:多干扰源信号;信号识别;盲信号分离;独立分量分析;公共信道

中图分类号: TP391.4; TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)03-0277-06

中文引用格式:张鹏伟.采用 ICA 的公共信道多干扰源信号的自动识别方法[J].智能系统学报,2013,8(3):277-282.

英文引用格式:ZHANG Pengwei. Automatic recognition of multi-interference source signals in the common channel based on independent component analysis [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(3): 277-282.

Automatic recognition of multi-interference source signals in the common channel based on independent component analysis

ZHANG Pengwei

(College of Electrical & Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: A new method was presented to solve the problem of automatic recognition of multi-interfering signals in the common channel. Based on the independent component analysis (ICA), the multi-interfering blind signal separation technology was adopted to separate the interfering signals, which are mixed at the same time. Also the algorithm selected the features of each signal and interference in time domain, frequency domain and high-order cumulant domain to complete the recognition of the interfering signals. The computer simulation utilizes the automatic recognition method to solve the problem of two types of signals and four interferences mixed in the same channel, and the results show that after five times of iteration the algorithm achieves convergence with a good performance index of 0.21. The results also indicate that when SNR is more than 10 dB, the accurate interference separation rate is above 95%. And when SNR is less than 10 dB, the recognition rate drops greatly while the separation rate is hardly influenced, which proves the correctness and validity of this method.

Keywords: multi-interference source signals; signal recognition; blind signal separation; independent component analysis; common channel

通信信号的调制识别,是软件无线电、认知无线电以及电子对抗等领域的关键技术,是通信系统中信号检测和信息解调之间的关键环节.因此,该技术具有重要现实意义,研究十分广泛.其中,Nandi^[1]和 Azzouz^[2]的工作最具代表性,他们提出了一类时域特征参数,并结合判决理论和神经网络算法,能较好地识别出通信信号的调制方式.在此基础上,先后出现了许多利用通信信号高阶谱特征^[3]、小波域特征^[4]、循环谱特征^[5]以及分形特征^[6]进行调制识别

的算法,这些研究都是假设在同一个信道中同时只存在一个通信信号的前提下进行.文献[7]利用能量算子对单信道的 2~3 个混合信号进行分离和识别,该方法具有较好的时频分辨率以及瞬时自适应的特点,但是不能估计信号分量的初相,低信噪比时估计误差较大.

随着无线电技术在军用和民用领域的广泛应用以及大量干扰源的存在,各种用于无线电频谱监测、电子侦察的宽带接收机,甚至部分窄带接收机接收的信号往往呈现频域严重重叠、时域高度密集的特点.同一信道同时存在 2 个或多个干扰信号的情况

收稿日期:2012-07-02. 网络出版日期:2013-05-15.

通信作者:张鹏伟. E-mail: xxdfb2011@163.com.

也很普遍,特别在战时的热点地区.因此,共信道多个干扰信号的自动识别是一个亟需解决的实际问题.本文针对 6 个传感器同时接收在时域和频域共信道混叠的 4 个干扰(包括单音干扰、多音干扰、脉冲干扰和高斯干扰)和 2 个通信信号(QPSK 信号和 4FSK 信号)的情况,提出了首先通过盲信号分离技术将混合信号分离,然后针对干扰信号特征,从时域、频域、高阶累积量域和时频域进行特征提取和自动识别的方法,该方法简单、收敛速度快,具有较好的时频特性和瞬时自适应的特点.

1 信号模型及自动识别系统

接收到的混合信号模型如式(1)所示:

$$r(n) = Ax(n).$$

式中: $r(n) = [r_1(n), r_2(n), \dots, r_M(n)]^T$ 表示 M 个传感器接收到的混合信号矢量; $x(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_N(n), I_1(n), I_2(n), \dots, I_J(n)]^T$ 是源信号矢量,包括 N 个有用信号 $s_1(n), s_2(n), \dots, s_N(n)$ 和 J 个干扰信号 $I_1(n), I_2(n), \dots, I_J(n)$,为了方便后面的分析,还假设源信号的个数 $N+J$ 与传感器个数 M 相同; A 是一个 $M \times M$ 的矩阵,表示源信号 $x(n)$ 如何经过线性混合被传感器接收.混合矩阵 A 及源信号矢量 $x(n)$ 都是未知的,只有接收信号 $x(n)$ 是已知的,假设最多只能有一个非高斯源信号,每个源信号都具有统计独立性.由已知的 $r(n)$ 在 A 未知时求 $x(n)$ 就是一个信号盲分离问题.

本文主要针对的源信号为:1) 有用信号为 QPSK 和 4FSK 信号($N=2$),这 2 个信号是通信中使用较多、较有代表性的 2 类信号;2) 干扰信号有单音干扰、多音干扰、脉冲干扰和高斯干扰($J=4$),其中单音、多音干扰和高斯干扰是实际中最常见、最简单的干扰,而脉冲干扰属于一种宽带干扰,对许多通信系统影响较大.这些源信号经过不同的混合被 6 个($M=6$)传感器同时接收,每个传感器接收到的信号在时域和频域完全混合在一起.这些混合信号相互影响,相互叠加,造成识别时的 2 点困难:1) 信号数目很难确定,无法从混合信号中判断出到底是几个干扰信号的叠加;2) 即使知道干扰信号的个数,也无法提取原始信号的特征.

为了在这种比较复杂的情况下利用已有的单信号识别方法,需要对多干扰信号进行分离.现阶段多信号分离方法主要有 2 种:1) 基于时频分析的各种信号处理方法,包括固定系数滤波器、自适应滤波器、信号的功率谱及谱相关分析以及近几年提出的经验模式分解等技术^[8-10],这些方法往往对所处理

的信号或多或少需要知道一定的先验知识,而且对频域混叠信号不能有效分离;2) 数字波束形成技术^[11],主要在空域对信号进行分离,然而该方法需要知道信号的来波方向,同时还不能保证一个波束内的信号一定是单一信号.由此本文采用一种基于 ICA^[12] 的盲信号分离技术,更好地完成共信道多干扰信号的分离.图 1 就是基于 ICA 的多干扰信号自动识别系统框图.

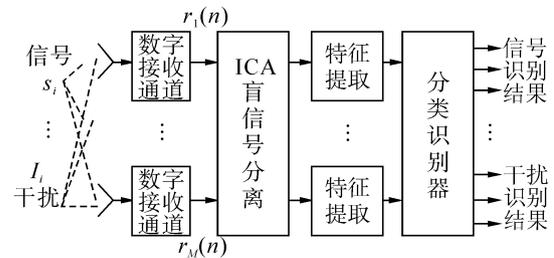


图 1 基于 ICA 的多干扰信号自动识别系统

Fig.1 The automatic recognition system of multi-interference source signals based on ICA

目前使用最多的 ICA 算法是 FastICA 算法. FastICA 算法本质上是一种最小化估计分量互信息的神经网络方法,它利用最大熵原理来近似负熵,通过使用一个非线性函数 g 便能直接找出任何非高斯分布的独立分量^[12].该算法具有以下优点:1) 无需像自适应算法那样引入调节步长参数,使用简单方便;2) 算法稳健性好,能对多种不同类型信号进行分离,适用范围广;3) 收敛速度非常快.因此本文也采用 FastICA 算法进行盲信号分离.需要指出的是,在使用 ICA 算法之前,一般还需要进行白化预处理^[13],以简化后面的分离处理,并对数据进行降维.

2 干扰信号分离后的特征提取及识别

目前信号的调制识别研究很多,并且已经取得了很好的效果,但是对于干扰识别的研究还很少.根据信号调制识别的相关思想,可以类似得到干扰识别方法的一般思路,即提取干扰信号的特征量,根据不同的特征量识别出不同的干扰信号.针对论文中单音干扰、多音干扰、脉冲干扰和高斯干扰 4 种不同干扰以及 QPSK 和 4FSK 2 个信号,分别从时域、频域、高阶累积量域以及时频域来提取干扰信号特征,以完成干扰信号自动识别.

2.1 脉冲干扰时域特征提取及识别

分析 6 个干扰信号的时域波形发现,脉冲干扰的取值只有 2 种,这是最明显的一个特征.实际使用时,考虑到分离性能不理想会造成分离后的干扰信号的幅度会有一些细微波动,所以实际分离后的脉

冲干扰取值不止 2 种,但总是在最大值或最小值附近波动.因此可以设一个阈值,如果某一个采样点的值在最大值或最小值附近的波动小于该阈值,则可以认为是与最大值或最小值相同,否则就是另一个新值.通过随机统计多个采样点的情况,如果取值只有 1 个或 2 个,则认为是脉冲干扰,否则就不是.据此就可以识别出脉冲干扰.

2.2 单音干扰和多音干扰频域特征提取及识别

分析 6 个干扰信号的频域特征发现,脉冲干扰、单音干扰和多音干扰的频域特征最为明显,都有明显的谱峰,差别只是谱峰个数的不同.单音干扰只有 1 个谱峰,多音干扰有多个谱峰,脉冲干扰谱峰最多.由于脉冲干扰对多音干扰判别有影响,因此在设计分类识别器时,首先要从时域判断出脉冲干扰,并将其从要识别的干扰信号中排除.这样就可以根据有无明显谱峰及谱峰个数很容易判断出单音和多音干扰了.

2.3 高斯干扰高阶累积量域特征提取及识别

高斯分布大于二阶的累积量为 0,根据这个性质可以识别高斯干扰.由于对称分布的三阶累积量为 0,而其他高阶累积量的计算过于复杂,因此现实中一般使用四阶累积量.严格的高斯分布在实际中并不多见,其四阶累积量也并不严格为 0,但总是一个靠近 0 的值,所以仍能用四阶累积量来识别高斯干扰.

2.4 QPSK 和 4FSK 信号时频域特征提取及识别

对 6 个干扰信号作时频分析,发现脉冲干扰、单音干扰、QPSK 信号和 FSK 信号的特征都比较明显.其中单音干扰基本是在其频率处的直线,只不过有小的波动;脉冲干扰基本是在零频处的一条直线,上面等间隔地(对应脉冲跳变的时刻)分布着小的尖峰抖动;QPSK 信号的时频谱基本也是一条直线,上面不规则地(对应相位跳变时刻)分布着不同的尖峰抖动,这些尖峰大约有 4 种;FSK 信号的时频谱像由不同的台阶组成一样,表示不同时段调频频率的不同,这些台阶共有 4 种.

由此可见,脉冲干扰和单音干扰其实完全可以通过时频谱进行识别,只是由于它们可以用更简单的方法识别,因此这里只考虑使用时频谱识别 QPSK 和 FSK 信号.QPSK 信号忽略尖峰抖动的时频谱基本为直线,这可以用来识别 QPSK 信号;对于 PSK 信号,则可以根据抖动尖峰不同种类的个数识别.4FSK 信号的时频谱由多个频率台阶组成,由此识别出其信号,相应地根据频率台阶不同种类的个数,还可以识别出 2FSK 等其他 FSK 信号.另外,采

用时频分析的方法还可以估计识别信号的频率.

2.5 识别器的构造

识别器有 2 种形式:一种是串行结构,如图 2 所示;另一种是混合结构,如图 3 所示.串行结构采用分级识别的方式,每次根据某个特征识别出 1~2 个干扰信号,然后将识别出的干扰信号从待识别的信号集合中去除,使待识别的干扰信号集合越来越小,这样不仅降低了识别难度和出错概率,而且能大大减少后续处理的运算量.由于脉冲干扰会对多音干扰识别造成困难,而且时域识别运算量最小,因此脉冲干扰的识别放在第 1 级.频域特征识别、四阶累积量特征识别及时频特征识别的运算量依次递增,因此将运算量最大的单元放到最后面,把运算量少的单元放在前面,这样能尽量减少整个系统的运算量.串行结构的缺点是,下一级识别单元必须等上一级单元完成识别后才能运算,因此整个系统需要时间较长,实时性不好.

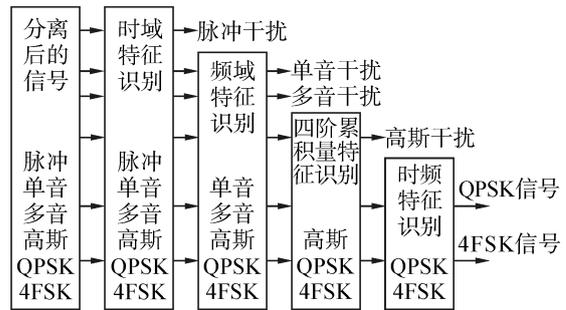


图 2 串行结构识别器

Fig.2 The recognition unit of serial structure

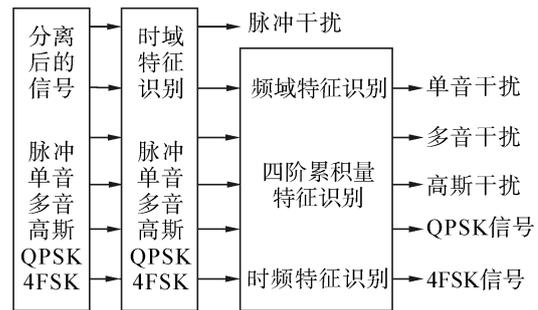


图 3 混合结构识别器

Fig.3 The recognition unit of mixed structure

混合结构能较好克服串行结构的缺点,增强识别系统的实时性,代价是运算量和复杂度增大.与串行结构一样,由于脉冲干扰会对多音干扰识别造成困难,因此混合结构中仍然需要首先在时域识别出脉冲干扰,然后才能对剩余的 5 个信号,同时从频域、四阶累积量域和时频域进行特征提取和信号识别,依次识别出相应的干扰信号.这 2 种结构的识别器各有优缺点,可根据实际需要选择使用.

3 仿真实验及分析

仿真实验中有 6 个干扰信号,其中,单音干扰的干扰频率为 200 Hz,多音干扰的 3 个频率为 160 Hz、300 Hz 和 500 Hz. QPSK 信号和 4FSK 信号分别是由 MATLAB 的时频工具箱产生. 所加噪声为 10 dB 的高斯白噪声. 信号采样频率为 2 000 Hz, 仿真中信号的长度取为 600 个采样点. 混合矩阵是一个 6×6 的矩阵, 其元素是由 MATLAB 随机产生的、均匀分布在 [-1, 1] 的随机数. 6 个源干扰信号通过混合矩阵的作用被 6 个传感器接收到.

采用基于负熵的 FastICA 算法对接收的混合信号进行分离, 其结果如图 4 所示. 其中第 1 列是原始的 6 个干扰信号, 依次是单音干扰、多音干扰、脉冲干扰、高斯干扰、QPSK 信号及 4FSK 信号, 它们已经加了 10 dB 的高斯噪声. 第 2 列是 6 个传感器分别接收到的混合干扰信号, 由于干扰信号混合在一起, 从图 4(b) 中很难分辨出原来的源信号, 因此传统的信号识别方法根本无法使用. 第 3 列是经过盲信号分离处理后, 从混合信号中分离出的信号, 这是源信号的估计. 从图 4(c) 中可以看到, 由于盲信号分离固有的信号幅度及排列顺序的不确定性, 导致分离后信号的幅度(包括符号)和排列顺序并不与源干扰信号相同. 但是, 分离信号的波形与源干扰信号基本相同, 直观看分离效果良好.

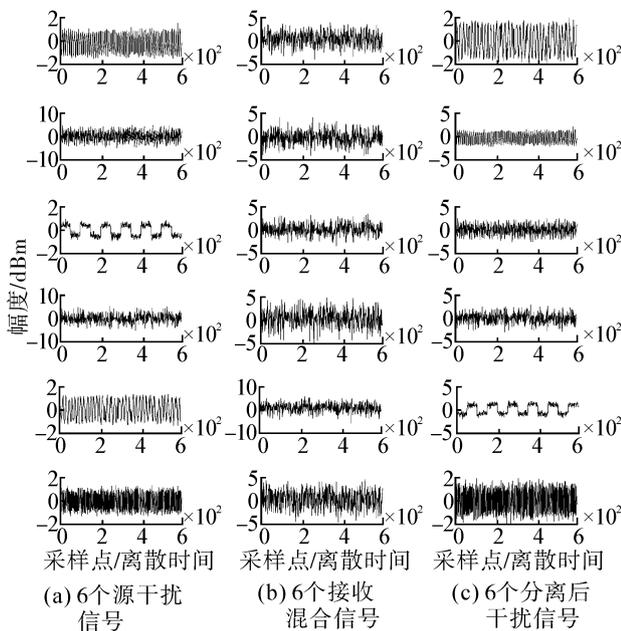


图 4 源干扰信号、混合信号及分离后信号的时域波形

Fig.4 The waveform in time domain of source interfering signals, mixed signals and separated signals

为了进一步验证分离算法的性能, 下面用性能指数 PI 来说明. PI 定义为

$$PI = \frac{1}{2M(M-1)} \times \sum_{i=1}^M \left\{ \left(\sum_{k=1}^M \frac{|g_{ik}|}{\max_j |g_{ij}|} - 1 \right) + \left(\sum_{k=1}^M \frac{|g_{ki}|}{\max_j |g_{ji}|} - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

式中: g_{ij} 为全局传输矩阵 G 的元素, $G = WA$, W 为分离矩阵, A 是混合矩阵. G 反映了原始的源信号与分离后信号之间的直接关系.

由于盲分离算法每迭代一次可以得到一个分离矩阵 W , 从而可以得到相应的 G , 然后由式(1)计算得到 PI 值, 据此可以画出 PI 值与迭代次数的曲线^[14](即算法性能曲线), 如图 5 所示. 从中可以看到算法收敛很快, 只需要 5 次迭代就收敛了. 收敛时的 PI 值大约为 0.21, 说明分离效果较好.

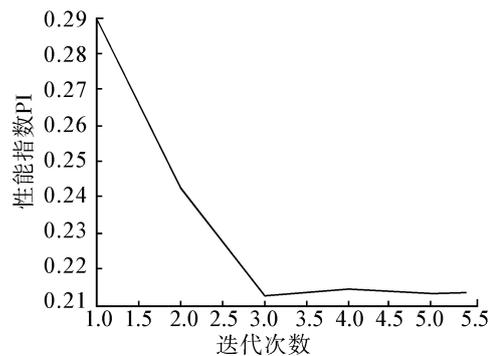
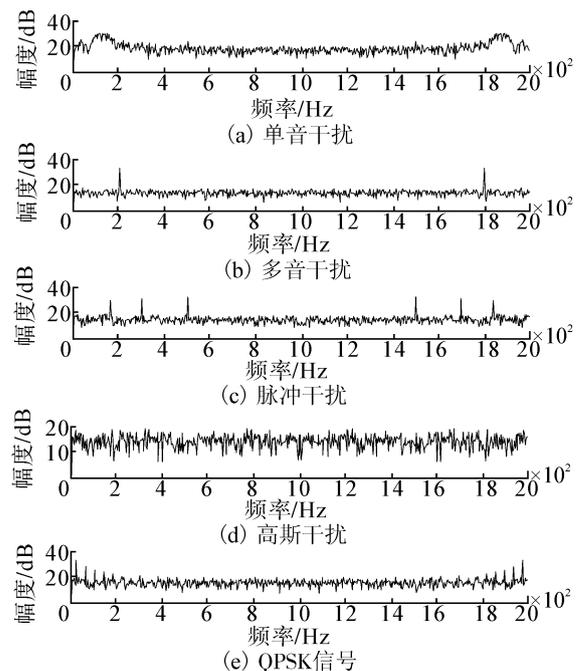


图 5 分离算法性能曲线

Fig.5 The performance curve of the segregation algorithm



(e) QPSK 信号

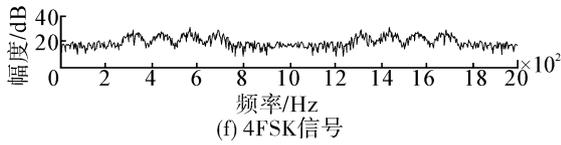


图 6 分离后干扰信号的频域波形

Fig.6 The waveform in frequency domain of the segregated interfering signals

事实上,根据分离后的干扰信号波形,已经基本能直接看出干扰信号的类型,因此如果是人工辅助识别,这时任务基本已经完成,然而由于是干扰信号自动识别,因此还需要通过后续的特征提取进行识别.图 6 和 7 从上至下依次分别表示分离后的单音干扰、多音干扰、脉冲干扰、高斯干扰、QPSK 信号及 4FSK 信号的频谱图和时频分析图,从中可以看到第 2 节介绍的特征提取及识别方法是可行的.

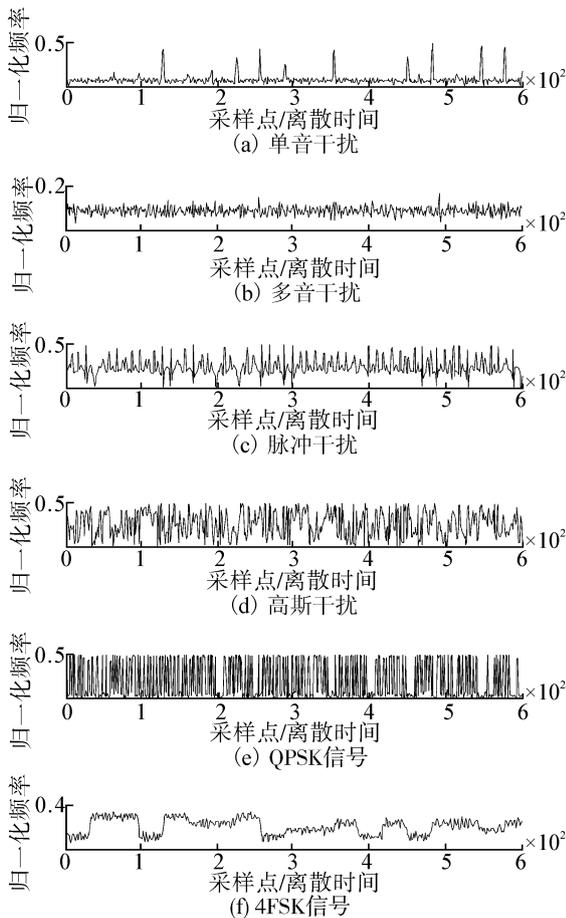


图 7 分离后信号的时频谱

Fig.7 The waveform in time and frequency domain of the segregated interfering signals

表 1 是分离后几个干扰信号的四阶累积量,可以看到高斯干扰的四阶累积量更接近于零,因此可以根据该特征进行识别.

表 1 分离后 6 个干扰信号的四阶累积量

Table 1 The tetrachord cumulant of the six segregated interfering signals

信号	四阶累积量
单音	-0.249 3
多音	-0.308 4
脉冲	-1.687 2
高斯	-0.036 3
QPSK	-0.766 8
4FSK	-0.200 4

经过 100 次 Monte-Carlo 实验,得到干扰信号正确分离率和识别率如表 2 所示.从表 2 中可以看到,正确分离率大于正确识别率,新方法对脉冲干扰的分离效果稍差,对 QPSK 和 4FSK 的识别率也稍差,其他干扰信号的分离和识别效果都比较好.当信噪比低于 10 dB 时,分离率变化不大,但是识别率严重下降.

表 2 干扰信号 100 次仿真得到的正确分离率及识别率

Table 2 The accurate segregation and discrimination rate of the simulation

信号	正确分离率	正确识别率
单音	100	96
多音	100	95
脉冲	95	89
高斯	100	95
QPSK	96	90
4FSK	98	86

由上面的仿真结果可见,论文提出的对多个公共信道干扰信号,通过先分离后特征识别的方法是正确和有效的.

4 结束语

通过分析一般信号自动识别技术在解决多干扰、信号公共信道混合这种复杂情况下进行信号识别的不足,本文提出了利用盲信号分离技术先对混合信号进行分离,然后针对不同干扰及信号的不同特征进行识别的方法.该方法是解决类似问题的一种比较通用和灵活的方法.因为通过盲分离后,信号都变成单路,可以充分利用已有的信号识别的理论和方法进行识别,有较好的继承性.虽然本文以 4 个干扰信号和 2 个通信信号的自动识别为例进行论述,但事实上,可以通过加上不同的特征提取方法和分类器识别其他多种干扰和信号类型,因此本文的工

作还可以进一步深入并应用到多种场合.

参考文献:

- [1] NANDI A K, AZZOUZ E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(4): 431-436.
- [2] AZZOUZ E E, NANDI A K. Procedure for automatic modulation recognition of analogue and digital modulations [J]. IEE Proceedings Communications, 1996, 143(5): 241-273.
- [3] 陆凤波, 黄知涛, 易辉荣, 等. 一种基于高阶累积量的数字调相信号识别方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1611-1615.
LU Fengbo, HUANG Zhitao, YI Huirong, et al. Recognition algorithm of phase shift keying signals by higher-order cumulants [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9): 1611-1615.
- [4] PARK C S, CHOI J H, NAH S P, et al. Automatic modulation recognition of digital signals using wavelet features and SVM [C]//10th International Conference on Advanced Communication Technology. Gangwon-do, Korea, 2008, 1: 387-390.
- [5] WU Juanping, HAN Yingzheng, ZHANG Jinmei, et al. Automatic modulation recognition of digital communication signals using statistical parameters methods [C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems. Kokura, Japan, 2007: 697-700.
- [6] CHEN Xiaolong, WANG Jiali, XIN Li. A new automatic modulation recognition method in test and measurement technology [C]//8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Xi'an, China, 2007: 622-625.
- [7] 蔡权伟, 魏平, 肖先赐. 单信道多信号分量分离 [J]. 通信学报, 2006, 27(6): 49-56.
CAI Quanwei, WEI Ping, XIAO Xianci. Single channel multicomponents separating [J]. Journal on Communications, 2006, 27(6): 49-56.
- [8] 王磊, 陈鹏举, 陈乾. 修正平均周期图法在通信信号分选识别中的应用 [J]. 电讯技术, 2002, 42(4): 30-33.
WANG Lei, CHEN Pengju, CHENG Qian. Application of modified periodogram algorithm in classifying and identifying communication signals [J]. Telecommunication Engineering, 2002, 42(4): 30-33.
- [9] 李秋娜, 袁嗣杰, 刘东华. 基于 EMD 的混合信号盲分离方法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(6): 1358-1361.
LI Qiuna, YUAN Sijie, LIU Donghua. Method of blind separation for mixed signals based on empirical mode decomposition [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(6): 1358-1361.
- [10] 梁国龙, 董姝敏. 相干源盲分离及方位估计的算法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(11): 1478-1484.
LIANG Guolong, DONG Shumin. Study on algorithms of blind separation and DOA estimation about coherent sources [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(11): 1478-1484.
- [11] 贾朝文, 张学帅. 基于数字波束合成的空间信号分离研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(1): 86-89.
JIA Chaowen, ZHANG Xueshuai. Spatial signal separation based on DBF technique [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2006, 1(1): 86-89.
- [12] 贾银洁, 许鹏飞. 基于 FastICA 的混合音频信号盲分离 [J]. 信息与电子工程, 2009, 7(4): 321-325.
JIA Yinjie, XU Pengfei. Blind separation of mixed audio signal based on FastICA [J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(4): 321-325.
- [13] REN Xiaotian, XU Hui. Fast-ICA based blind estimation of the spreading sequences for down-link multi-rate DS/CDMA signals [J]. Intelligent Computation Technology and Automation, 2012, 5(1): 501-504.
- [14] 周治宇, 陈豪. 空间同频电子侦察信号的盲分离 [J]. 中国空间科学技术, 2009, 12(3): 10-15.
ZHOU Zhiyu, CHEN Hao. Blind separation of space radio reconnaissance signals with same frequency [J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 12(3): 10-15.

作者简介:



张鹏伟, 男, 1977 年生, 讲师, 主要研究方向为智能信息处理、模式识别. 发表学术论文 5 篇, 其中被 EI 检索 3 篇.