

# 单通道同频混合信号盲分离技术研究现状

张可<sup>a</sup> 朱诗兵<sup>a</sup> 李长青<sup>b</sup>

( 航天工程大学 a. 研究生院; b. 航天信息学院, 北京 101416)

**摘要:** 单通道同频混合信号的盲分离是信号处理领域的重要技术, 有着广泛的应用前景。介绍了单通道同频混合信号盲分离技术的现状及发展趋势, 详细讨论了单通道同频混合信号的盲分离方法, 在介绍盲分离算法理论的基础上对其优缺点进行总结。最后, 探讨了单通道条件下同频混合信号盲分离技术的进一步研究方向。

**关键词:** 同频混合信号; 单通道; 盲分离; 研究方向

**本文引用格式:** 张可, 朱诗兵, 李长青. 单通道同频混合信号盲分离技术研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 149–154.

**Citation format:** ZHANG Ke, ZHU Shibing, LI Changqing. Research Status of Single Channel Blind Separation Technology for Co-frequency Mixed Signal[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering 2018, 39(6): 149–154.

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 2096–2304(2018)06–0149–06

## Research Status of Single Channel Blind Separation Technology for Co-frequency Mixed Signal

ZHANG Ke<sup>a</sup>, ZHU Shibing<sup>a</sup>, LI Changqing<sup>b</sup>

( a. Graduate School; b. School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Single-channel blind separation for co-frequency mixed signal is one of the important technique in the field of signal processing and has a wide range of application prospects. This paper introduces the status and development trend of single-channel blind separation technology for co-frequency mixed signal. The method of single-channel blind separation technology for co-frequency is discussed in detail. The advantages and disadvantages of the blind separation algorithm are summarized on the basis of the introduction of the theory of blind separation algorithm. Finally, the further research direction of single-channel blind separation for co-channel mixed signal is discussed.

**Key words:** co-frequency mixed signal; single channel; blind separation; research direction

盲信号分离(BSS)技术是盲信号处理领域的重要研究内容,在国防和民用领域有着广泛的应用。该技术可以在没有或者仅有很少通信方先验知识的前提下,对混合信号按照一定方法进行处理,分离出分量信号的源信息。

根据接收天线与发射天线个数的关系,可以将混合信号分离方法进行分类。当接收天线个数小于发射天线个数时,对应的盲信号分离被称之为欠定盲信号分离。当只有一路接收信号时,欠定盲信号分离退化为单通道盲信号分离。在实际应用中,一些特殊环境不适合进行多天线部署,并且单

天线的接收在一定程度上可以降低成本。随着通信技术的发展,同频混合信号的单通道接收情况将越来越常见。因此,对同频混合信号在单通道接收条件下的盲分离技术进行研究具有十分重要的意义。

目前,对于音频信号<sup>[1]</sup>、生物医学<sup>[2]</sup>等自然信号的单通道混合信号的盲分离研究较多。常用的方法有独立分量分析(ICA)方法<sup>[3]</sup>和计算听觉场景分析(CASA)方法<sup>[4]</sup>等。此外,单通道盲分离也广泛应用在雷达信号分离中<sup>[5–6]</sup>。对于音频、图像信号或雷达信号的处理主要基于此类信号具有

收稿日期: 2018–01–11; 修回日期: 2018–02–10

作者简介: 张可(1993—),男,硕士研究生,主要从事通信与信息系统研究。

一定的特征。然而,对于通信信号而言,由于其不具有类似特征基的表示,因此无法用语音等自然信号处理方法进行分离。因此,通信信号单通道盲分离技术是信号处理领域的一个重要研究课题。

## 1 单通道同频混合信号分离方法概述

单通道同频混合信号盲分离需要从一路接收信号中分离出多路信号的源信息。在数学上讲,该问题是病态的且存在多种可能解,较传统多通道盲分离的难度大大增加。然而在实际情况下,单个接收机经常会同时接收到多个同频信号。因此,对于同频混合信号在单通道接收条件下盲分离的研究十分必要。

对于单通道同频混合信号,可以通过构造多通道的条件,利用多通道处理方法进行源信号的分离;还可以从寻找分量信号的差异性角度进行分离;或者采用符号序列与信道参数联合估计等方法进行混合信号的分离。

### 1.1 多通道条件构造法

单通道盲信号分离的过程相当于从接收的一路混合信号中分离出多路源信息,因此其难度远远高于超定、正定盲分离或欠定盲分离。将单通道接收信号通过一定方法构造混合信号超定或正定条件,利用超定或正定的盲恢复算法进行信号分离。

2003年, E. S. Warner 等<sup>[7]</sup>在研究多路 MPSK 信号单通道盲信号分离时提出采用过采样和延时线方法构造多通道接受条件。当过采样倍数为 2 时,可以得到奇数倍过采样信息  $y_m^e$  和偶数倍过采样信息  $y_m^o$ 。

$$y_m^e = \sum h_{2k} d_{2(m-k)} \quad (1)$$

$$y_m^o = \sum h_{2k+1} + d_{2(m-k)} \quad (2)$$

在数学上来说,经过过采样处理后的单通道混合信号盲分离不再是病态问题,可以采用常规 ICA 算法进行各个信号的恢复。需要注意的是,上述方案对存在频偏、相偏的信号分离性能较差,噪声的存在也会影响分离的性能。为了充分利用混合信号频偏、相偏条件,2011年,张纯等<sup>[8]</sup>构造了信号载波相频差异矩阵,将单通道接收信号构造多通道形式,然后以核密度估计为基础,采用遗传算法寻找分离矩阵,完成混合信号的盲分离。与传统盲分离算法相比,该方法适用性较好,有良好的分离效果。

此外,杨海兰等<sup>[9]</sup>在采用希尔伯特黄变换(HHT)对混合信号的分量信号个数进行估计基础上,通过构造多通道条件,采用 FastICA 方法对单通道接收信号进行盲分离。FastICA 又称固定点算法,属于比较常见的 ICA 算法。若用向量  $w_i$  表示第  $i$  次投影式的投影方向,可以构建分离模型:

$$y_i = w_i^T x \quad (3)$$

为使提取分量信号之间数据独立性最大,可以采用基于负熵最大化的独立性准则,负熵可按下式计算:

$$J(y_i) \approx c[E\{G(y_i)\} - E\{G(v)\}]^2 \quad (4)$$

为使负熵最大化,参照公式:

$$J(w) \approx [E\{G(w^T x)\} - E\{G(v)\}]^2 \quad (5)$$

在 FastICA 方法应用方面,2013年孙庆瑞<sup>[10]</sup>采用正交采样的方法将单通道混合信号进行处理,使其转换成两路正交的基带混合信号。该方法构造了适定盲分离条件,采用 FastICA 方法进行单通道盲信号的分离,在低信噪比条件下也具有较好的分离性能和执行效率。然而,该算法主要针对低阶调制信号,对于高阶调制信号的分离效果较差。因此,寻找适用于高阶调制信号的盲分离算法很有必要。2015年,郭一鸣等<sup>[11]</sup>采用过采样构造多通道条件,进而构造出信道矩阵,利用连续干扰抵消算法实现单通道同频混合信号的盲分离。与文献[10]所提算法相比,该算法分离性能较好并且可以适用于高阶调制信号的盲分离。然而该方案受时延差和接收信号过采样倍数影响较大,存在解调盲区。

对于上述算法,大都是在构造多通道条件后,采用 ICA 算法对多通道条件下的同频混合信号进行盲分离。对此,2015年赵宇峰<sup>[12]</sup>利用过采样构建多通道模型,采用格基规约和判决反馈方法进行同符号率时频混合信号的分离。该方案与最大似然法相比算法复杂度降低,但是分离性能略有下降。

### 1.2 差异构造法

单通道同频混合信号无法在时域、频域或码域上进行区分,因此寻找适合单通道同频混合信号分离的“分离域”十分重要。此外,由于通信信号具有有限符号集特性,可以通过寻找组成混合信号的各分量信号的参数差异进行盲分离。也就是说,对于单通道同频混合信号的盲分离,可以从分析信号参数差异和信号谱域差异两方面入手进行相应的研究。

在寻找通信信号参数差异方面,参数差异主要体现在符号速率、成型滤波、幅度等参数的差异上。

对于符号速率不同的两个 MPSK 信号,文献[13]在单通道接收条件下采用小波变换的方法对干扰信号进行重建,然后采用干扰抵消的办法从混合信号中分离出有用信号。然而该方法对两信号间符号速率差有一定的要求,即要求符号速率差远小于其中一路符号速率。

对于存在幅度差异的两个分量信号,可以采用波形重构的方法进行盲分离。两信号幅度差异过大的情形常出现在非对称条件下的混合信号中。对于非对称混合信号,可以利用通信信号功率上的差异,采用干扰重构方法进行强信号和弱信号的分离。文献[14]介绍了一种采用迭代技术的同频重叠信号干扰消除方法,在提高分离性能的同时具有较低的复杂度。

此外,根据基于波形重构的干扰抵消原理,提出双信号接收机的概念<sup>[15]</sup>。为了提高双信号接收机的接收性能,提出相应改进算法<sup>[16]</sup>。通过采用双信号接收机,将强信号进行解调重构,从混合信号中进行抵消从而完成强弱信号的分离。以上采用波形重构方法均可作为非对称混合信号分离方案。需要注意的是,基于波形重构的干扰抵消方法的分离

性能受参数估计误差及误码率的影响较大,因此选取合适的参数估计算法十分关键。

在寻找“分离域”方面,可以通过寻找混合信号之间在谱域上的不同实现混合信号的分离。文献[17]针对频谱重叠信号,采用循环平稳方法,通过在接收端设置频移滤波器将混合信号分离。该方案在干信比较大时也能保持良好的分离性能,然而频移滤波器分离性能对循环频率误差较敏感。文献[18]结合时频混合信号在循环频率域上的可区分性,采用盲LMS频移滤波器对单通道时频重叠信号进行分离,但是该方案的分离效能受参考信号和频移量的影响较大。总的来说,对于变换域方法而言,不是所有混合信号之间都具有不同的谱域,因此会存在无法利用变换域进行信号分离的情况。

### 1.3 粒子滤波法

粒子滤波法目前在盲均衡、定时同步、目标跟踪、定位导航等<sup>[19-20]</sup>领域有着广泛的应用。此外,粒子滤波法在语音信号处理、图像处理领域也有相关应用<sup>[21]</sup>。20世纪50年代,Hammeraley等<sup>[22]</sup>提出序贯重要性采样法,由于该方法中采样粒子存在退化问题,后来虽然提出了一系列改进算法,仍影响了它的应用与普及。1993年,Gordon等<sup>[23]</sup>提出了自举滤波(BPF)算法,该算法在序贯重要性采样的基础上引入了重采样的概念。重采样思想的提出使粒子退化问题得到突破,从而极大地促进了粒子滤波法的研究与应用。

粒子滤波法是一种基于蒙特卡洛仿真的近似贝叶斯滤波算法,被广泛应用在非线性和非高斯状态估计问题中<sup>[24]</sup>。它的优越之处在于其巧妙地将最大后验概率分布复杂的积分运算转化为求和运算。在粒子滤波法中,后验概率 $p(x_{0:t}|y_{0:t})$ 可以表示为:

$$p(x_{0:t}|y_{0:t}) = \sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^i \delta(x_{0:t} - x_{0:t}^i) \quad (6)$$

其中, $\{x_{0:t}^i; i=1, \dots, N\}$ 为抽样粒子, $N$ 为粒子总数, $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克函数。为便于采样,引入重要性函数 $\pi(x_{0:t}|y_{0:t})$ 并设置重要性权重 $w_t^i$ :

$$w_t^i = \frac{p(x_{0:t}|y_{0:t})}{\pi(x_{0:t}|y_{0:t})} \quad (7)$$

$\tilde{w}_t^i$ 为归一化重要性权重。在对未知变量 $\theta_k$ 进行估计时,可以采用最大后验概率准则估计:

$$\hat{\theta}_k = \arg \max_{\theta_k} \sum_{i=1}^N \tilde{w}_k^i \delta(\theta_{1:k} - \theta_{1:k}^i) \quad (8)$$

当选取的粒子数量足够多时,可以有效地逼近真实的最大后验概率分布。该算法对参数有良好的跟踪能力,具有较好的适应性。因此,可以应用粒子滤波法对单通道同频混合信号进行符号序列与调制参数的联合估计。

在通信领域,2006年,LIU等<sup>[25]</sup>建立了混合信号的状态转移模型,采用粒子滤波法对单通道条件下两个MPSK混合信号进行了盲分离。然而该方案在权重更新过程中,对其中的似然函数进行了近似,使其分离性能受到影响。在此基础上,2007年,Tu Shilong等<sup>[26]</sup>对粒子采样公式和权重公式重

新推导。在粒子滤波盲分离算法中采用Max-Log-Map处理方法对权重更新公式进行简化,使算法复杂度得到有效降低。

在粒子滤波法的应用过程中,随着迭代次数的增加,大部分粒子的权重趋近于零,产生采样粒子的退化现象。退化现象会影响对参数的有效估计,使估计出的参数精度降低,收敛速度下降。为了提高参数估计精度,文献[27]选取Beta分布为参数采样粒子分布,对基于粒子滤波盲分离算法进行了改进。与传统参数采样法相比,Beta分布更好地接近真实后验概率分布,大大提高了参数估计精度和收敛速度。在解决粒子退化方面,可以通过多种重采样的方法对粒子进行处理。最常见的重采样方法是多项式重采样<sup>[28]</sup>。其主要思想是复制权重较大的粒子,抛弃权重较小的粒子。重采样示意图如图1所示。

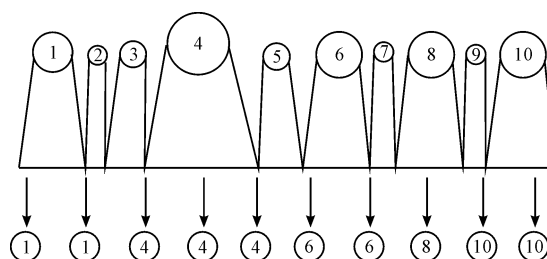


图1 重采样示意图

重采样虽然有效减缓了粒子退化现象,但会导致权重大的粒子被多次复制,引起粒子贫化,大大影响了符号序列的分离效果。为了改善粒子贫化问题,2014年,路威等<sup>[29]</sup>提出一种采用遗传算法进行单通道条件下的盲分离的算法。该算法将遗传算法与粒子滤波法结合起来。针对粒子滤波存在的粒子退化等问题,利用遗传算法中的选择、变异和交叉的过程对粒子进行重采样,有效解决了粒子退化现象,并且保持了粒子多样性。此外,该方案对于可以应用于低信噪比下的盲分离,分离性能也有一定的改善。

### 1.4 逐幸存路径处理法

在单通道盲分离研究中,可以根据联合符号序列和信道估计的思想,采用逐幸存路径处理(PSP)法进行盲分离。传统的联合序列估计的方法是最大似然估计(MLSE)法,然而采用最大似然估计法对参数进行估计时存在一定的延迟现象<sup>[30]</sup>,导致估计出的参数与真实参数相比发生变化。逐幸存路径处理(PSP)算法就是在最大似然估计法的基础上发展而来的。PSP算法以MLSE方法中维特比算法为基础,引入基于数据辅助的方法对信道进行估计。也就是说,在信道参数未知的情况下,PSP算法可以在进行符号估计的同时对信道的参数进行相应的估计。

2008年,TU S L等<sup>[31]</sup>提出逐幸存路径处理法对两个QPSK同频信号进行单通道盲分离,将信道响应和数据符号进行联合估计。该算法将最小均方(LMS)算法和判决反馈序列估计(DFSE)的思想融入到PSP算法中,实现了两同频

QPSK 信号的单通道盲分离。理想情况下,该算法可以达到较好的分离性能,有较快的跟踪速度,但该算法复杂度较大。

单通道混合接收模型可以写成:

$$y_k = f_k^T s_k + v_k \quad (9)$$

传统的自适应 MLSE 法采用 Viterbi 算法对最大似然估计进行实现,将 Viterbi 算法网格图中时刻  $k$  的状态定义为

$$\mu_k = \{\phi_{k-L+2}, \dots, \phi_{k-L}\} \quad (10)$$

$k+1$  时刻发生状态转移  $\mu_k \rightarrow \mu_{k+1}$ , 相应估计误差为

$$e(\mu_k \rightarrow \mu_{k+1}) = y_k - f_k^T s_k(\mu_k \rightarrow \mu_{k+1}) \quad (11)$$

其中,  $f_k^T$  表示信道估计器在  $k$  时刻的输出。然后从所有转移到  $\mu_{k+1}$  的路径中选取幸存路径,更新路径度量:

$$\Gamma(\mu_k) = \min_{\mu_k} \{ \Gamma(\mu_k) + |(\mu_k \rightarrow \mu_{k+1})|^2 \} \quad (12)$$

PSP 算法就是通过选择最优幸存路径及最优幸存路径对应的信道估计器估计值完成对符号序列和信道的联合估计。

由于 PSP 算法复杂度较高,因此如何降低算法复杂度是研究的重点。2008 年,许小东等<sup>[32]</sup>提出了一种自适应减少幸存路径的方法,即在减复杂度 MLSE 算法基础上提出了 PSP-RMLSE 算法。该算法通过提出最小欧式距离的近似估计方法,自适应地减少幸存路径的留存数目,有效地减小了 PSP 算法的复杂度。该算法在信噪比较高时,分离性能较好,但在低信噪比下需要增加计算量以达到较好的分离效果。为了在低信噪比条件下也能得到较好的盲分离性能,涂世龙等<sup>[33]</sup>利用纠错编码,提出了基于 M-PSP 算法的单通道盲分离算法。通过加入编码约束条件,使其较未编码时具有更优的性能。通过将 M-PSP 方法与先分离再译码的 PSP 方法进行仿真分析发现,纠错编码方案在相同误码率条件下对信噪比的要求更低,但是该算法只适合于短约束编码。在此基础上,ZHANG D L 等<sup>[34]</sup>提出一种基于比特交织编码调制算法的迭代译码(BICM-ID)方案。该方案可以实现联合解调译码,从而有效地从单通道接收信号中将多路信号分离出来。在非协作通信系统中,该方案可以在不进行分离的前提下直接进行同频混合信号的盲恢复。与文献[33]中的 M-PSP 算法相比,该算法在相同的信噪比下具有较低的误码率,并且该方法更加容易实现,操作也更加简便。

在传统的 PSP 算法中,输出的符号序列需要在接收端进行硬判决。为了提高后端译码的性能,需要使用 PSP 方法的盲分离算法可以输出软信息。为了得到相应的软信息,考虑将 SOVA 和 BCJR 算法进入到 PSP 盲分离中。2014 年,杜健等<sup>[35]</sup>结合成对载波多址(PCMA)信号的盲分离问题,提出了前馈非二元码软输出维特比(SOVA)算法,将 SOVA 算法引入到 PSP 算法当中,从而得到 SOVA-PSP 算法进行单通道同频混合信号的盲分离。与传统 PSP 算法相比,SOVA-PSP 算法可以提供软信息用于后端译码,大大提高了盲分离的性能,但依然存在高复杂度的问题。相应的,文献[36]提出了应用于 PCMA 信号盲分离的 PSP-BCJR 算法。该算法采用前向和后向递归方法计算,有效地增加了符号软信息的可靠

性。与 SOVA-PSP 算法相比,该算法在信噪比较低时,分离性能相对增强,但复杂度略有提高。

分析发现,上述方案大多数是基于相同符号率条件下的同频混合信号盲分离。针对不同符号速率 PCMA 信号,郭一鸣等<sup>[37]</sup>于 2017 年提出了 DG-PSP 算法。利用双网格等效分量信号信道状态,通过对双网格状态进行迭代实现对 PCMA 信号的盲分离。该算法通过迭代处理,有效提高了信噪比增益,然而其分离性能易受到相偏和时延估计误差的影响。

## 1.5 其他方法

除上述介绍的几种主要方法以外,还有一些方法被应用到单通道同频混合信号的盲分离中,如基于多项式拟合的分离方法<sup>[38]</sup>,基于马尔可夫链蒙特卡洛的分离方法<sup>[39]</sup>等。

## 2 进一步研究方向

单通道通信信号的盲分离技术现已应用到军事和民用通信的各个领域,具有广阔的发展空间。针对现有研究方法的不足,进一步改进现有分离算法并研究新的盲分离方法,对于单通道混合信号盲分离技术的发展具有重要意义。下一步,对于单通道同频混合信号盲分离的研究可以从以下几个方面进行考虑:

1) 对于混合信号中分量信号个数的研究。目前所研究的单通道盲分离算法中,通常假设同频混合信号中分量信号个数为两个。在实际单通道接收条件下,接收到的信号可能是多个信号的混合。源信号的个数影响着盲分离算法的性能,因此对单通道同频混合信号中源信号的个数进行研究是一项重要的研究内容。

2) 对于信号调制识别方式的研究。混合信号的调制识别方式对同频混合信号盲分离算法的选择具有指导意义,因此对混合信号的调制识别方式十分重要。目前混合信号的识别多集中于单个信号,因此下一步应将调制方式研究从单信号识别扩展到多个混合信号识别。针对目前已有的混合信号调制识别方式,应根据应用场景进行相应改进或者创新。

3) 对于多个(两个以上)混合信号单通道盲分离方法的研究。现有分离算法大多考虑两个同频信号混合的情况,较少涉及两个以上信号重叠混合的情况。而在实际应用中,两个以上多信号的混合情况十分常见。因此,研究多信号混合的单通道盲分离对于实际应用十分必要。

4) 对于不同符号速率的盲分离算法的研究。目前,对于 PCMA 信号的盲分离算法的研究集中于相同符号速率的分量信号间的盲分离。在实际应用中,不同符号速率的分量信号进行混合的情形也较为常见。因此应该加强对不同符号率的混合信号盲分离算法的研究。

5) 对于减轻算法复杂度方面的研究。以粒子滤波法或逐幸存路径法为例,尽管两种盲分离算法对单通道同频混合信号具有良好的分离性能,但算法复杂度仍然较高,算法收

敛速度仍有提升的空间。因此,研究降低盲信号分离算法复杂度的改进算法是盲分离算法的研究方向之一。

6) 对于提高盲分离性能方法的研究。单通道条件下同频混合信号盲分离算法性能仍有提升的空间。对于两个同频混合信号而言,盲分离相当于从一路混合信号中分离出两个源信号,因此其分离性能远不能达到单信号解调性能。此外,实际应用中,接收信号的信噪比往往较低,而现有分离算法大多需要信号具有较高的信噪比。对于低信噪比的情形,分离的性能会降低,难以满足实际分离性能的要求。因此研究低信噪比条件下分离性能较好的盲分离算法十分必要。可以考虑将信道或信源编码与盲分离算法相结合,从而在低信噪比下也可以达到较好的分离效果。

### 3 结论

单通道盲分离技术广泛应用于频谱监控、通信对抗、通信安全等各个领域,对于单通道接收条件下混合信号的盲分离的研究具有十分重要的意义。本文对同频混合信号盲分离技术研究现状进行了较为详细的介绍,展望了单通道同频混合信号盲分离技术的发展方向。本文的研究分析对单通道接收条件下同频混合信号盲分离技术的研究具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] RAGHI E R, LEKSHMI M S. Single channel speech separation with frame-based summary autocorrelation function analysis[C]. *Procedia Technology*, 2016, 24: 1074 – 1079.
- [2] KOPRIVA I, JU W, ZHANG B et al. Single-channel sparse non-negative blind source separation method for automatic 3-D delineation of lung tumor in PET images [J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2017, 21(6): 1656 – 1666.
- [3] LU G, XIAO M, WEI P et al. Single channel blind separation of oversampling communication signals based on ICA [C]//2014 IEEE International Conference on Communication Problem-solving. Beijing, 2014: 364 – 367.
- [4] COMON P. Independent component analysis a new concept [J]. *Signal Processing*, 1994, 36(3): 287 – 314.
- [5] ZHU H, ZHANG S N, ZHAO H C. Single channel source separation of radar fuze mixed signal based on phase difference analysis [J]. *Defence Technology*, 2014, 10(3): 308 – 315.
- [6] ZHU H, ZHANG S N, ZHAO H C. Single-channel source separation of multi-component radar signal based on EVD and ICA [C]. *Digital Signal Processing*, 2016, 57: 93 – 105.
- [7] WARNER E S, PROUDLER I K. Single-channel blind signal separation of filtered MPSK signals [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(6): 396 – 402.
- [8] 张纯, 杨俊安, 叶丰. 基于载波相频差异矩阵的单通道盲分离算法[J]. *探测与控制学报*, 2011, 33(4): 67 – 71.
- [9] 杨海兰, 刘以安. 单通道通信信号盲分离算法[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(9): 205 – 208, 285.
- [10] 孙庆瑞. 通信信号的单通道盲分离技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [11] 郭一鸣, 杨勇, 张冬玲, 等. 基于 SIC 的单通道同频混合信号低复杂度盲分离算法[J]. *信号处理*, 2015, 31(7): 860 – 866.
- [12] 赵宇峰. 单通道时频混叠通信信号盲分离研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [13] HEIDARI S, NIKIAS C L. Co-channel interference mitigation in the time-scale domain: the CIMTS algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(9): 2151 – 2162.
- [14] ARSLAN H, MOLNAR K. Iterative co-channel interference cancellation in narrowband mobile radio systems [C]//2000 IEEE Emerging Technologies Symposium on Broadband, Wireless Internet Access. TX, 2000.
- [15] JANSSEN G J M. Dual-signal receiver structures for simultaneous reception of two BPSK modulated co-channel signals using signal cancellation [J]. *Wireless Personal Communications*, 1994, 1(1): 43 – 59.
- [16] BERANGI R, LEUNG P, FAULKNER M. Co-channel interference cancellation for mobile communication systems [C]//Proceedings of ICUPC-5th International Conference on Universal Personal Communications. MA, 1996: 438 – 442.
- [17] 刘云, 郭洁, 叶芝慧, 等. 频谱重叠信号分离的循环平稳算法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005(3): 333 – 337.
- [18] 付海涛. 基于循环平稳的单信道时频重叠信号分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [19] MASMITJA I, BOUVET P J, GOMARIZ S et al. Underwater mobile target tracking with particle filter using an autonomous vehicle [C]//OCEANS 2017-Aberdeen. Aberdeen, 2017: 1 – 5.
- [20] LIN X G, SUN H Y, WANG Y H. Dynamic positioning particle filtering method based on the EnKF [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2017: 1871 – 1876.
- [21] 韩轲. 粒子滤波综述[J]. *黑龙江科技信息*, 2007, (16): 26.
- [22] HAMMERSLEY J M, MORTON K W. Poor Man's Monte Carlo [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 1954, 16(1): 23 – 38.

- [23] GORDON N J ,SALMOND D J ,SMITH A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation [J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing ,1993 , 140 ( 2) : 107 – 113.
- [24] 刘国连. 成对载波多址接入信号盲分离技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学 2015.
- [25] LIU K ,LI H ,DAI X C ,et al. Single channel blind separation of cofrequency MPSK signals [C]//Proceedings of International Conference on Communication , Internet and Information Technology ,Saint Thomas: United States Virgin Islands 2006: 42 – 46.
- [26] TU S L ,CHEN S H ,ZHENG H ,et al. Particle filtering based single-channel blind separation of co-frequency MPSK signals [C]//Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2007: 582 – 585.
- [27] 马欢 ,江桦. 改进的粒子滤波单通道盲分离算法 [J]. 数据采集与处理 2016 ,31( 5) : 1051 – 1058.
- [28] 刘凯. 粒子滤波在单通道信号分离中的应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学 2007.
- [29] 路威 ,张邦宁 ,张杭. 利用遗传粒子滤波的单通道扰信盲分离算法 [J]. 数据采集与处理 2014 ,29( 5) : 783 – 789.
- [30] 毕琰. 基于成对载波多址技术的卫星通信关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学 2013.
- [31] TU S L ,ZHENG H ,GU N. Single-channel blind separation of two QPSK signals using per-survivor processing [C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. 2008: 473 – 476.
- [32] 许小东 ,路友荣 ,戴旭初 ,等. 自适应减少复杂度的盲最大似然序列估计 [J]. 电子学报 2008( 10) : 2044 – 2048.
- [33] 涂世龙 ,陈越新 ,郑辉. 利用纠错编码的同频调制混合信号单通道盲分离 [J]. 电子与信息学报 2009 ,31( 9) : 2113 – 2117.
- [34] ZHANG D L ,XU Y Q ,ZHANG J ,et al. Blind separation of the single-channel mixed signal based on BICM-ID [C]//2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering ( CSAE) . 2012: 194 – 198.
- [35] 杜健 ,巩克现 ,葛临东. 基于单路定时准确的低复杂度成对载波复用多址信号盲分离算法 [J]. 电子与信息学报 , 2014 ,36( 8) : 1872 – 1877.
- [36] 杜健. 欠定盲源分离和 PCMA 信号盲分离技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学 2014.
- [37] 郭一鸣 ,彭华 ,杨勇 ,等. 基于 DG-PSP 的不同符号速率 PCMA 信号盲分离算法 [J]. 通信学报 2017 ,38( 3) : 92 – 100.
- [38] BARBAROSSA S ,PETRONE V. Analysis of polynomial-phase signals by the integrated generalized ambiguity function [J]. IEEE Transactions on Signal Processing ,1997 ,45 ( 2) : 316 – 327.
- [39] YANG Y ,PENG H ,ZHANG D L ,et al. Markov chain Monte Carlo-based separation of Paired carrier multiple access signals [J]. IEEE Communications Letters ,2016 ,20 ( 11) : 2209 – 2212.

( 责任编辑 杨继森)