

同频重叠信号的单通道盲分离方法综述

芮国胜^a, 徐彬^b, 张嵩^b

(海军航空工程学院, a. 电子信息工程系; b. 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘 要: 同频重叠信号单通道分离在信号分离领域具有广阔的应用前景, 成为近年来信号处理领域研究的热点之一。在回顾了自然信号单通道分离方法的基础上, 对同频重叠信号的单通道盲分离方法作了详尽的分析, 总结了国内外的研究成果, 讨论了现有理论和方法的优缺点及应用条件, 最后指出了今后可能的进一步研究方向。

关键词: 单通道盲分离; 同频重叠信号; 多用户检测; 序列联合估计; 综述

中图分类号: V271.4; TN911

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2011)09-0058-06

A Survey on Single Channel Blind Separation for Co-Frequency Overlapping Signals

RUI Guosheng^a, XU Bin^b, ZHANG Song^b

(Naval Aeronautical & Astronautical University, a. Electronic Information Engineering Department;

b. Graduate Students' Brigade, Yantai 264001, China)

Abstract: Single channel blind separation for co-frequency signals becomes a hot topic in signal processing field, which will have a wide application in the future. The single channel source separation for natural signals was studied, on which basis particular analysis was made for blind separation algorithms of co-frequency overlapping signals. The advantages, disadvantages and application conditions of existed theories and methods for separation were discussed, and the further development of it in the future is given.

Key words: SCBSS; co-frequency overlapping signal; multi-user detection; joint sequence estimation; survey

0 引言

近年来,单通道盲源分离以其广阔的应用领域和发展前景引起信号处理领域极大的关注。目前,对单通道盲源分离的研究主要集中在自然信号方面(如语音信号、图像信号等),其主要的分离方法有:1) 基于模型的分离方法^[1-3],主要采用建模和估计两步法实现,首先利用训练数据集对说话者特征空间建模,再利用信源模型和混合信号对信源进行估计;2) 转换为传统的欠定盲分离的方法,信源被投影到基函数集合上,根据其系数的稀疏性,利用独立分量分析^[4-5]、非负矩阵分解^[6-7]或者稀疏编码^[8-9]等手段来实现分离;3) 基于计算听觉场景分析方法^[10-12],主要思想就是通过

适当的变换后观测信号被分成时频单元,然后利用一些准则(如偏差、调和性、位置等)把同一环境引起的成分组合起来合成信源。

对于通信信号来讲,通信信号的特殊性使得针对语音信号特性的传统的单通道分离算法受到了局限。例如计算听觉场景分析主要是针对低频信号,对于高频信号处理无能为力^[13];又如利用基函数分解结合数据训练方法进行信号分离,它仅对于具有这种基函数特性的语音信号有分离作用^[14]。因此,通信信号的单通道盲分离需根据信号和信道的差异性来实现单通道的分离,特别是混合信号不存在时域、频域、空域和码域的区分度时,其盲分离将变得十分困难。例如非协作条件下典型的 PCMA 通信信号^[15]、TDMA 同频干扰信号 CCI^[16-17]等。

1 分离方法综述

同频重叠信号由于同时不具备时域、频域、空域和码域的区分度,较传统的单通道盲源分离不同,难度也

收稿日期:2010-09-26

修回日期:2010-11-09

基金项目:泰山学者建设专项基金资助

作者简介:芮国胜(1968—),男,山东烟台人,博士,教授,博导,研究方向为通信信号处理、小波理论及其应用等。

更大。同频单通道盲分离主要集中在利用传统的干扰抵消思想分两步来实现信号分离;或基于多用户检测的思想对信号分量序列进行联合估计;或针对各个信号的特点以及信号之间的差异性来构造分离域进行分离等几个方面。

1.1 基于“干扰抵消”的方法

在同频重叠信号分离研究的早期,主要研究功率不对称信号分量的分离。当信号分量功率相差很大(一般情况大于6 dB)时,传统的解调器将锁定在强信号上,从而造成弱信号的丢失。因此,可以在利用传统方法重构强信号后,对混合信号的强信号部分进行抑制,从而分离出弱信号。

文献[18]较早研究了连续包络角度调制信号的分离问题,提出了利用混合信号幅度方差来估计相位失真,利用估计值来平衡混合信号的相位失真,进一步得到功率强的信号分量,再从混合信号中适当减去强信号,进而实现信号分离。随后又对上述方法进行改进,采用自适应的方法进一步提高了开环估计精度,得到较满意的分离效果,但是对功率比的要求还比较高^[19]。与此类似,文献[20]提出了“解调-重调制”技术,通过传统解调器完成对强信号的解调后重新进行调制,并以此从混合信号中抵消从而得到弱信号,完成了对两路MEFSK信号的分离,但相位噪声的存在极大影响了其分离效果。在此基础上,文献[21]讨论了多路BPSK混合信号分离接收机的结构,并讨论了其性能。文献[22]讨论了非协作条件下PCMA信号的截获问题,仿真表明在没有先验信息的前提下能够实现PCMA通信信号的截获和解调。

文献[23]提出一种由两个连贯的传统接收机构成的双信号接收机概念,利用了由于发送序列差异带来的信号正交性来分离同时接收的两路窄带BPSK混合信号,随后进一步研究了DPSK信号的情况^[24],进一步分析了莱斯衰落信道下窄带BPSK信号分离的平均BER和接收机损耗,仿真表明当信号强度差异较小时,其性能急剧下降^[25]。鉴于此,文献[26]提出利用前向纠错编码提供的冗余来增强双信号接收机的性能,仿真表明该方法能大大降低对信号分量强度差异性的要求。文献[27]还深入讨论了适用于双信号接收机的频率估计策略,利用TDMA中训练序列来降低干扰以增强估计准确性。

1.2 多用户检测的方法

基于干扰抵消的方法处理功率不对称重叠信号能够较圆满地解决信号分离。但是,混合信号功率差异不大,甚至信号分量功率接近的应用场合越来越多,需要进一步研究相应的分离算法来解决此类问题。

1.2.1 最大似然序列估计的算法

在存在高斯白噪声和符号间干扰情况下,最大似然序列估算法(MLSE)^[28]是一种最优的检测算法,它和Viterbi算法相结合被广泛应用。文献[29]的研究表明,Viterbi算法在存在ISI情况下能够直接应用于多路同频信号的检测。文献[30-31]等在此基础上提出了联合最大似然序列估算法(JMLSE)对同频混合信号进行联合估计,其思想就是选择使观测噪声和假设无噪声接收序列之间的欧氏距离平方最小的 $J+1$ 个序列,如式(1)所示^[32]:

$$(\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_J) = \arg \min_{\substack{a_0, \dots, a_J}} \sum_{k=0}^{K-1} \left| y[k] - \sum_{j=0}^J \sum_{l=0}^L h_{j,l}[k] \tilde{a}_j[k-l] \right|^2 \quad (1)$$

其中, $a_j = [a_j[0], \dots, a_j[K-1]]$ 。但是,JMLSE算法复杂,复杂度随着混合信号个数 J 、调制信号阶数 M 和信道响应长度 L 呈指数增加,大大限制了它的使用。由此,产生了一系列降低JMLSE算法复杂度的改进算法。

延时判决反馈序列估算法(DDFSE)减少了信号信道响应长度,是降低MLSE算法的有效手段^[33],文献[31]结合DDFSE算法,提出了降低JMLSE算法复杂度的联合延时判决反馈序列估算法(JDDFSE),如式(2)所示。

$$(\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_J) = \arg \min_{\substack{a_0, \dots, a_J}} \sum_{k=0}^{K-1} \left| y[k] - \sum_{j=0}^J \sum_{l=0}^L h_{j,l}[k] \cdot \tilde{a}_j[k-l] - \sum_{j=0}^J \sum_{l=k+1}^L h_{j,l}[k] \hat{a}_j[k-l] \right|^2 \quad (2)$$

与JMLSE算法相比其核心思想就是定义了可调整的参数 $0 \leq k_j \leq L$,计算量只与信号分量个数、调制阶数和可调整参数有关,和信道响应长度无关,降低了其复杂度。研究表明:当对JDDFSE算法进一步采用自适应状态分配^[35]优化可调整参数,则其性能几乎可以和最优的JMLSE算法相当^[32]。文献[36]进一步研究了利用JDDFSE算法解决TDMA蜂窝网络中单天线中CCI干扰消除问题,讨论了可调整参数的选择策略。文献[37]根据各个信号分量功率动态地截短信道响应长度以减少JMLSE算法的复杂性,但算法利用了波达方向信息并不算是真正意义上的单通道情况;文献[38]也从减少信道响应长度的角度,基于最小均方误差判决反馈均衡器(MMSE-DFE)的思想,设计了一个前置滤波器减少了各分量信道的CIR,降低了JMLSE算法计算量。

1.2.2 最大后验序列估计算法

文献[39]在贝叶斯递归理论基础上提出了基于最大后验准则的符号检测算法(MAPSD),其估计为

$$\hat{d}^{k,L} = \arg \max_{d(k-L)} \sum_{d(k)} \cdots \sum_{d(k-L+1)} p(d^{k,L} | r^k) \quad (3)$$

文献[28]结合文献[39]的算法,提出了针对同频干扰信号的联合最大后验准则的符号检测算法(JMAPSD),其思想就是将式(3)中的单个序列用联合序列 $D^{k,L} = \{d_1^{k,L}, d_2^{k,L}\}$ 来代替,其计算复杂度与JMLSE算法相当,因此实用性大打折扣。为此,文献[40]设计降低JMAPSD算法复杂性的次优“两步”算法,该算法结构与解调-重调制技术的结构类似分步来实现序列的估计,与JMAPSD算法相比,两步算法使得复杂度从 M^{L+L+2} 降低到 $M^{L+1} + M^{L+1}$,收到较为满意的效果。但是,由于采用了与解调-重调制技术相似的结构对信号分量的功率比要求较高,限制了它的应用。

1.3 信号参数差异方法

同频单通道混合信号分离问题由于混合信号同频重叠,不具备从时域、频域或其他常见分离域上进行分离的条件,因此从混合信号各分量之间参数的差异出发就成为了研究此类分离的一个重要的方向,利用信号差异化的参数进行信号分离的研究近来也引起了许多研究者的注意^[41-50]。

针对两路存在符号速率差异的 MPSK 信号混合信号,文献[41-42]构建了有用信号的正交小波基函数,将小波变换作用于单通道混合信号重建出干扰信号,然后从混合信号中减去干扰信号得到有用信号。该算法复杂度比JMLSE和JMAPSD算法要低,易于实现,但是要求两路信号符号速率差异要远小于任何一路符号速率,在ISI条件下其性能明显下降^[43]。而对于符号速率相同的情况,如果混合信号为无偏同步,文献[44]利用成形滤波器的差异,采用过采样条件下使用ICA算法直接分离MPSK混合信号,但存在非线性因素(如频偏、相偏等)时分离效果不佳;文献[45]则利用信道编码差异对非扩频的同频干扰信号进行了分离;如果无偏同步信号不存在其他方面差异则信号分离将变得异常困难。而对于符号速率相同的无偏异步信号,文献[46]采用过采样方法,利用多个分量时延差得到类似多通道的接收模型,然后利用输入数字信号的有限集特性实现信号分离,但是该法在欠定大噪声下性能较差;文献[47]则采用过采样技术,利用多个信号的时延差提出了基于时延分集的多址方式进行信号分离。文献[48]利用二进制信号的后续观测值进行聚类的方法进行信道紧缩,在此基础上利用文献[49]提出的算法成功地进行了盲分离。而对于符号速率相同的有频偏信号,文献[50]采用估计两路源信号频率和相位的方法,并通过最小化目标函数估计出其中一路源信号的成形脉冲响应和信道响应,同时抽取符号序列,但该方案仅适用于BPSK信号。

1.4 其他方法

粒子滤波算法被广泛应用于盲均衡、CDMA多用户检测等通信领域中。文献[51]建立了同频混合信号的状态转移模型,把粒子滤波理论引入到同频混合信号的单通道分离中来。在此基础上,文献[52-53]研究了同频MPSK混合信号的分离,得出其参数性能逼近克拉美界,符号性能逼近联合界,但该算法计算量较大,并随调制阶数呈指数增长。进一步地,文献[54]在对不确定环境序列估计的PSP算法基础上,提出基于PSP算法的单通道盲分离算法,该算法与基于粒子滤波的算法性能相当,计算量却大大降低,但是PSP算法无法应用于不同速率信号混合的场合,并且需要更为精确的参数估计。文献[55]应用粒子滤波算法,解决了MPSK和LFM混合信号的单通道盲分离问题,也收到较好效果。

除了上面介绍的方法之外,还有其他一些方法如基于模型拟合的方法^[56-57]、基于能量算子的方法^[58]、基于累积量系统方程的方法^[59]等。

2 存在挑战和进一步研究方向

同频重叠信号单通道盲分离在近年来已取得令人欣慰的发展,针对不同的应用场合和信号特点提出了若干新理论、新方法,并取得初步的成功。但是当前的研究还存在如下问题:1)信号分量数目均为假设条件,一般为两个信号的混合,没有涉及信号分量数目估计问题;2)算法过于复杂,而对于两个以上混合信号情况就更为复杂,缺乏实用价值;3)大多数算法需要提供训练样本进行信道估计,有些还对训练样本有特殊要求,并非真正意义上的全盲;4)对信噪比要求较高,低信噪比条件下算法性能不佳;5)多数算法仅适用于两路混合信号分量的分离,而对于多路信号需进一步研究。

鉴于此,提出以下几个值得关注的研究方向。

1)信号分量个数估计是个急待解决的问题,也是盲分离领域中一个十分棘手的问题。现有的大多数算法都是在假设信号分量个数的前提下进一步研究的,但很多实际情况并事先不知道混合信号各分量数目,并且有的情况混合信号数目动态变化。虽然已经有了一些信号数目估计的初步探索,但这些还远远不够。而对于同频重叠单通道信号而言,其混合信号分量数目的确定又是一大困难。

2)进一步研究低复杂度的盲分离算法。现有的算法复杂度较高,并且随信道响应长度、调制阶数等参数呈指数增长。虽然已经有了一些降低复杂度的算法(如JDDFSE等算法),但对于实时性要求较高的场合

仍然不能满足需要;特别对于两路以上信号分离,其复杂度降低更是算法面临的关键问题。因此,如何改善算法性能,加快收敛速度对算法的实际使用具有决定意义。

3) 研究不依赖训练样本的分离算法,做到真正意义上的全盲分离。现有算法大多数均依赖训练序列对信道进行实时估计,但有些应用场合并不知道要分离信号的训练序列,或者说信号特性决定了没有训练序列信息可利用(如信号的侦收)。因此研究不依赖训练序列的分离算法是一个值得研究的方向。

4) 低信噪比条件下,分离算法性能需进一步改善和提高。对于混合的通信信号来讲,利用信道乃至信源编码来提高分离的性能,如目前通信中广泛采用的RS码、Turbo码、LDPC码等纠错能力较强的码,如何利用这些纠错码来提高分离效果、降低对信噪比的要求值得深入研究。

5) 当前分离算法,较少涉及两个以上混合信号分离的情况。但是,两个以上信号分量的时频重叠也是极为常见的情况,如何将目前算法应用到多个分量混合情况,既能保证一定的分离效果,又能降低算法复杂性是值得探讨的问题。

3 结束语

同频重叠信号单通道盲分离是信号单通道盲分离研究中独特的富有挑战性的一支,其广阔的应用前景,推动着研究工作不断进行,在短短几年里涌现了大量有效算法。但是,同频重叠信号单通道盲分离是近几年来才提出的,其理论和算法还不成熟。随着越来越多的新理论、新方法和应用理论的提出,必将大大促进分离的理论算法及应用不断地完善和发展,也将对盲分离领域的其他应用起到积极的推动作用。

参考文献

- [1] RADFAR M H, DANSEREAU R M, SAYADIYAN A. A joint identification-separation technique for single channel speech separation[C]//12th Signal Processing Education Workshop, 2006.
- [2] VINCENT E, PLUMBLEY M D. Single-channel mixture decomposition using Bayesian harmonic models[C]//ICA 2006, LNCS, 2006; 24-27.
- [3] RADFAR M H, DANSEREAU R M, SAYADIYAN A. Speaker-independent model-based single channel speech separation[J]. Neurocomputing, 2008, 72(3): 71-78.
- [4] JANG G J, LEE T W, WAN Y H, et al. Blind separation of single channel mixture using ica basis function[C]//3rd International Conference on ICA and BSS (ICA2001), 2001; 595-600.
- [5] DAVIESA M E, JAMESB C J. Source separation using single channel ICA[J]. Signal Processing, 2007, 87(8): 1819-1832.
- [6] MIKKEL N, SCHMIDE, MORTEN M. Nonnegative matrix factor 2-D deconvolution for blind single channel source separation[C]//ICA 2006, LNCS 3889, 2006; 700-707.
- [7] SCHMIDT M N, OLSSON R K. Single-channel speech separation using sparse non-negative matrix factorization[C]//Int Conf. Spoken Lang. Process, 2006; 2614-2617.
- [8] LI Y, AMARI S, CICHOCKI A, et al. Underdetermined blind source separation based on sparse representation[J]. IEEE Trans. Speech Audio Process. 2006, 54(2): 423-437.
- [9] FEVOTTE C, GODSILL S J. A Bayesian approach for blind separation of sparse sources[J]. IEEE Trans. Audio Speech and Lang Process. 2006, 14(6): 2174-2188.
- [10] HU G, WANG D L. Monaural speech segregation based on pitch tracking and amplitude modulation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2004, 15(5): 1135-1150.
- [11] WANG D L. On ideal binary mask as the computational goal of auditory scene analysis[C]// Speech Separation by Humans and Machines, Kluwer, 2005; 181-197.
- [12] LI P, GUAN Y, XU B, et al. Monaural speech separation based on computational auditory scene analysis and objective quality assessment of speech[J]. IEEE Trans. Audio Speech and Lang, Process, 2006, 14(6): 2014-2023.
- [13] WU M Y, WANG D L, BROWN G J. A multiple tracking algorithm for noisy speech[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2003, 11(3): 229-241.
- [14] JANG G J, LEE T W. Single channel signal separation using time domain basis functions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(6): 168-171.
- [15] DANKBERG M. Paired carrier multiple access (PCMA) for satellite communications[C]//Pacific Telecommunications Conference, Honolulu, 1998; 25-32.
- [16] LAURILA J, KOPSA K, SCHURHUBER R, et al. Semi-blind separation and detection of cochannel signals[C]//IEEE International Conference on Communications, 1999; 17-22.
- [17] SHISHIR K L, HARI K V S, WICHMAN R. Low complexity method to estimate co-channel signals using an antenna array[C]//IEEE International Conference on Personal Wireless Communication, 1999; 97-100.
- [18] BAR-NESS Y, BUNIN H. Co-channel interference cancellation and signal separation method[C]// Int. Conference on Communication, Philadelphia, 1988; 1077-

- 1081.
- [19] BAR-NESS Y, BUNIN H. Adaptive co-channel interference cancellation and signal separation method [C]//IEEE International Conference on Communications, BOSTONICC, 1989:825-830.
 - [20] GOOCH R, JORGENSEN C, READY M. The demod-remod technique for demodulating co-channel fsk signals [C]//Twenty-Fifth asilomar conference on signals, systems and computers, pacific grove, 1991:704-709.
 - [21] MINH A. NGUYEN. Interference Cancellation Receiver [R]. The MITRE Corporation, 2005.
 - [22] 付迪, 高勇. 非对称 PCMA 卫星信号的截获方法[J]. 现代电子技术, 2007, 7(7): 28-30.
 - [23] GERARDJ M, JANSSEN. Receiver structure for simultaneous reception of two BPSK modulated cochannel signals [J]. Electronics Letters, 1993, 29 (12): 1095-1097.
 - [24] JANSSEN, GERARD 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.
 - [25] JANSSEN, GERARD J M. BER and outage performance of a dual-signal receiver for narrowband BPSK modulated co-channel signals in a Rician fading channel [C]//5th IEEE International symposium on personal, indoor and mobile radio communications, The Hague, 1994:601-601.
 - [26] KLAUS W G, ERARD J M, JANSSEN, et al. Performance enhancement of a dual-signal receiver system for simultaneous reception of two co-channel signals by applying error correction coding [C]//The 8th IEEE International symposium on personal, Indoor and Mobile radio Communications, Helsinki, 1997:698-703.
 - [27] MORETTI M. A frequency estimation scheme for a two-signal environment [C]//IEEE VTC 50th Conference, Amsterdam, 1999:1800-1804.
 - [28] GIRIDHAR K. Joint estimation algorithms for cochannel signal demodulation [C]//In Proc IEEE ICC, Geneva, Switzerland, 1993:1497-1501.
 - [29] VAN ETTEN W. Maximum-likelihood receiver for multiple channel transmission Systems [J]//IEEE Trans. on Comm, 1976, 24(2): 276-283.
 - [30] GIRIDHAR K. Nonlinear techniques for the joint estimation of cochannelsignals [J]. IEEE Trans, Commun, 1997, 45(4): 473-484.
 - [31] ETTEN W. Maximum likelihood receiver for multiple channel transmission systems [J]. IEEE Trans Commun 1976, 24(2): 276-283.
 - [32] HOEHER P A, BADRI-HOEHER S, XU W, et al. Single-antenna co-channel interference cancellation for TDMA cellular radio systems [J]. IEEE Wireless Commun. Mag. 2005, 12(2): 30-37.
 - [33] DUEL-HALLEN A, HEEGARD C. Delayed decision-feedback sequence estimation [J]. IEEE Trans. Commun, 1989, 37(5): 428-436.
 - [34] HAFEEZ A, HUI D. Interference cancellation for EDGE via two-user joint demodulation [C]// IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003: 1025-1029.
 - [35] HOEHER P A, BADRI-HOEHER S. Joint delayed-decision feedback sequence estimation with adaptive state allocation [C]//ISIT 2004, Chicago, 2004:133.
 - [36] HOEHER P A, BADRI-HOEHER S, DENG Shiyang, et al. Single antenna interference cancellation (SAIC) for cellular TDMA networks by means of joint delayed-decision feedback sequence estimation [J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2006, 5 (6): 1234-1237.
 - [37] CHEN J T, LIANG J W, TSAI H S. Low complexity joint mlse receiver in the presence of cci [C]//IEEE International Conference on Communications, 1998:704-708.
 - [38] BADRI-HOEHER S, HOEHER P A, KRAKOWSKI C, et al. Impulse response shortening for multiple co-channels [C]//IEEE International Conference on Communications, 2005:1896-1900.
 - [39] ABEND K, FRITCHMAN B D. Statistical detection for communication channels with intersymbol interference [J]. Roceedings of the IEEE, 1970, 58(5): 779-785.
 - [40] GIRIDHAR K, MATHUR A, SHYNNK J. A blind adaptive MAP algorithm for the recovery of cochannel signals [C]//IEEE Military Communications Conference, 1994:133-138.
 - [41] HEIDARI S, NIKIAS C L. A new method for the design of high performance receivers in the presence of co-channel interference [C]//Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1994:496-499.
 - [42] HEIDARI S, NIKIAS C L. A new linear co-channel interference mitigation algorithm [C]//IEEE Military Communications Conference, 1995:97-101.
 - [43] 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.
 - [44] WARNER E S, PROUDLER I K. Single-channel blind signal separation of filtered MPSK signals [J]. Radar Sonar Navig, 2003, 150(6): 396-402.
 - [45] MURATA H, YOSHIDA S. Trellis coding for nonlinear

- cochannel interference cancellation if non-spread signals [C]//11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, 2000: 175-178.
- [46] YELLIN D, PORAT B. Blind identification of FIR systems excited by discrete-alphabet inputs [J]. IEEE transactions on signal processing, 1993, 41 (3): 1331-1339.
- [47] MAÏÉ. signal separation using fractional sampling in multiuser communications [J]. IEEE transactions on communications, 2000, 48 (2): 242-251.
- [48] DIAMANTARAS K I, PAPADIMITRIOU T. Blind deconvolution of multi-input single-output systems with binary sources [J]. IEEE transactions on signal processing, 2006, 54 (10): 3720-3731.
- [49] DIAMANTARAS K I, CHASSIOTI E. Blind separation of n binary sources from one observation: A deterministic approach [R]. Workshop ICA BSS, 2000.
- [50] PEDZISZ M, MANSOUR A. A simple idea to separate convolutive mixture in an underdetermined scenario [C]//14th ESSANN, 2006: 12-18.
- [51] LIU K, LI H, DAI X, et al. Single channel blind separation of cofrequency MPSK signals [C]//Proc. Commu. Internet and Inf. Technology, 2006: 42-46.
- [52] TU Shilong, CHEN Shaohe, ZHENG Hui, et al. Particle filtering based single-channel blind separation of cofrequency MPSK signals [C]//Proceedings of 2007 international symposium on intelligent signal processing and communication systems, Xiamen, 2007: 582-585.
- [53] TU Shilong, CHEN Shaohe, ZHENG Hui, et al. On the performance of single-channel blind separation of two cofrequency MPSK signals [C]//2007 IEEE Region 10 Conference TENCON, 2007: 1-4.
- [54] TU Shilong, ZHENG Hui, GU Na. Single-channel blind separation of two QPSK signals using per-survivor processing [C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2008: 473-476.
- [55] CHEN X J, ZHANG Y, TANG B, et al. Single channel MPSK signal and LFM signal separation using particle filtering [C]// ICCS, 2008: 870-874.
- [56] AHMED Y, REED J H, TRANTER W H, et al. A model-based approach to demodulation of co-channel MSK signals [C]//Global telecommunications conference, 2003: 2442-2446.
- [57] 蔡权伟, 魏平, 肖先赐. 基于模型拟合的重叠信号盲分离方法 [J]. 电子学报, 2005, 33 (10): 1794-1798.
- [58] 蔡权伟, 魏平, 肖先赐. 单通道多信号分量分离 [J]. 通信学报, 2005, 27 (6): 49-56.
- [59] CHENG H. Mixing vector estimation in single channel blind source separation of angle modulated signal sources based on cumulant system of equations [J]. Signal Processing, 2009, 89 (10): 1-9.
- (上接第 17 页)
- 驾驶仪设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (4): 422-426.
- [7] 孙蕊, 王青. BTT 导弹再入飞行滑模控制器设计研究 [J]. 电光与控制, 2008, 15 (9): 77-83.
- [8] 米文鹏, 李冰, 黄华, 等. 模糊指数型终端滑模控制在导弹姿态控制系统中的应用研究 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (5): 92-96.
- [9] 段广仁, 王好谦. 多模型切换控制及其在 BTT 导弹设计中的应用 [J]. 航空学报, 2005, 26 (2): 144-147.
- [10] LIN C K, WANG S D. An adaptive H_∞ controller design for bank-to-turn missiles using ridge Gaussian neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2004, 15 (6): 1507-1516.
- [11] 陈海通, 姜长生. 自适应模糊 H_∞ 输出反馈控制在导弹自动驾驶仪设计中的应用 [J]. 电光与控制, 2007, 14 (4): 53-57.
- [12] 叶振信, 傅维贤, 王万军, 等. 战术导弹 BTT 控制技术发展综述 [J]. 航天控制, 2009, 27 (5): 106-112.
- [13] 郑建华, 杨涤. 鲁棒控制理论在倾斜转弯导弹中的应用 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2001.
- [14] ASTROM K J, HAGGLUND T. Advanced PID control [M]. Research Triangle Park, NC: Instruments Society of American, 2005.
- [15] KRISTIANSSON B, LENNARTON B. Evaluation and simple tuning of PID controllers with high-frequency robustness [J]. Journal of Process Control, 2006, 16 (2): 91-102.
- [16] ASTROM K J, HAGGLUND T. PID controllers: Theory, design, and tuning [M]. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [17] WANG Q G, ZHANG Z P, ATROM K J, et al. Guaranteed dominant pole placement with PID controllers [J]. Journal of Process Control, 2009, 19 (2): 349-352.
- [18] KEEL L H, BHATTACHARYYA S P. Robust, Fragile, or Optimal [C]//IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42 (8): 1098-1105.
- [19] YANG G H, WANG J L. Non-fragile H_∞ control for linear systems with multiplicative controller gain variations [J]. Automatica, 2001, 37 (5): 727-737.