

doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.002

盲源分离在雷达对抗中的应用研究现状及挑战

王川川, 曾勇虎, 朱宁

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对实际问题的复杂性, 对盲源分离 (blind source separation, BSS) 在雷达对抗应用中的研究现状及面临的技术挑战进行综合分析。对雷达信号分选、雷达抗干扰和信号波达方向估计领域的研究现状进行总结和分析, 着重剖析算法研究和应用中存在的理论和实际问题。结果表明: 该研究对盲源分离、雷达对抗等领域的研究工作具有一定的参考价值。

关键词: 盲源分离; 独立性; 稀疏性; 雷达信号分选; 雷达抗干扰; 波达方向估计

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Research Status and Challenges of Blind Source Separation in Radar Countermeasure

Wang Chuanchuan, Zeng Yonghu, Zhu Ning

(No. 63892 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In view of the complexity of practical problems, the research status and technical challenges of blind source separation (BSS) in radar countermeasure applications are comprehensively analyzed. This paper summarizes and analyzes the research status of blind source separation in the field of radar signal sorting, radar anti-jamming and signal direction of arrival estimation in radar countermeasures, focusing on the theoretical and practical problems in the algorithm research and application. The results show that the research has a certain reference value for blind source separation, radar countermeasures and other fields.

Keywords: blind source separation; independence; sparsity; radar signal sorting; radar anti-jamming; direction of arrival estimation

0 引言

随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 时代的到来, 盲源分离 (BSS) 作为一类重要的机器学习方法, 已成为语音信号分离、地震监测、股票预测、文本分析、图像和生物医学信号处理、无线通信系统、雷达对抗等领域的研究热点^[1-7]。BSS 理论起源可以追溯到近几十年来引起人们极大关注的鸡尾酒会问题。鸡尾酒会问题激发了 BSS 技术的产生, 被设想为用智能处理机制来模拟人耳的功能。BSS 方法是数据驱动思想的重要应用, 能够极大降低对数据或隐变量特性的要求^[8-9]。

在无线电信号处理领域, 接收机接收信号越来越多的出现信号混叠情形^[10], 对经典的信号滤波处理理论提出了巨大的挑战。BSS 由于仅需要源信号具备独立性、稀疏性、非负性等特性, 不需要知道源信号和混合系数更多信息, 就能够实现源信号的分离, 有望实现同频或频谱混叠情况下的源信号分离, 因而引起国际信号处理界的极大关注, 成为人工智能和信号处理领域的研究热点。

将盲源分离技术应用于雷达对抗领域, 具有重

要的理论研究和潜在应用价值。截至目前, 关于盲源分离理论及其在雷达对抗中的可能应用, 虽然发表了大量的研究成果, 但对应用中所面临技术挑战的综合分析还鲜见报道。开展此综合分析, 能够为研究人员运用盲源分离技术解决雷达对抗中的技术难题、寻找雷达对抗装备技术升级的智能化方案提供启发。笔者对盲源分离理论在雷达对抗中应用的研究状况进行了综述, 具体为盲源分离在雷达信号分选、雷达抗干扰和信号波达方向估计中的应用研究状况, 以期对相关研究工作提供有益的参考。

1 BSS 算法分类及其与信号滤波的异同

BSS 是一类技术的统称, 是在不知道源信号和混合系数先验信息的情况下, 仅根据观测信号实现源信号的分离或恢复。这里的“盲”, 是指源信号不可观测, 以及源信号如何混合不可知; 因此, 实现源信号的分离或恢复, 仅有观测信号可资利用。

1.1 盲源分离算法分类

为方便研究 BSS 理论, 学者们对 BSS 算法进行了分类。主要有 3 种分类方法, 如图 1 所示^[11-12]。

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2024-12-07

基金项目: 国家重点实验室开放基金 (CEMEE2022Z0304)

第一作者: 王川川 (1985—), 男, 河南人, 博士。

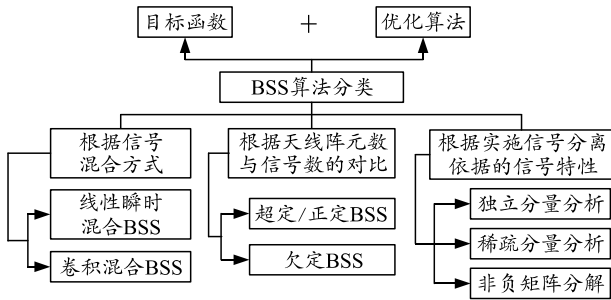


图 1 BSS 算法分类

1) 根据源信号混合过程中, 源信号到达接收天线阵是否有时间延迟, 以及是否存在多径, 可以分为卷积混合模型和线性瞬时混合模型。

线性瞬时混合模型是盲源分离中最经典也是最重要的一种模型, 描述的是多个源信号同时到达天线阵列的情形, 如图 2 所示^[13]。

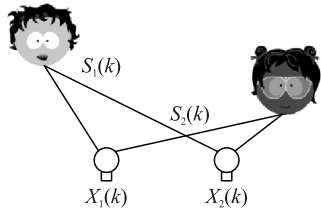


图 2 线性瞬时混合盲源分离模型

数学模型为:

$$X(k) = AS(k) + N(k). \quad (1)$$

式中: $X(k) = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_m(k)]^T$ 为天线阵列接收

的多路观测信号; $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$ 为天线阵

列的阵列流形, 在盲源分离模型中称为混合矩阵; $S(k) = [S_1(k), S_2(k), \dots, S_n(k)]^T$ 为到达天线阵列的多个辐射源信号; $N(k) = [N_1(k), N_2(k), \dots, N_m(k)]^T$ 表示各个接收通道混叠的加性噪声; m 和 n 分别为天线阵元数(也是观测信号维数)和辐射源信号数; $k=1, 2, \dots, T$ 为信号的采样时刻。

需要说明的是, 式(1)所示盲源分离模型与阵列信号处理中的信源数估计数学模型、波达方向估计数学模型是相同的, 但是盲源分离问题研究中, 现阶段只考虑观测信号混叠的噪声 $N(k)$ 为加性高斯白噪声。在信源数估计和波达方向估计中, 由于这 2 类问题研究得更为深入, 考虑的混叠噪声主要为高斯白噪声, 对于色噪声下的信源数估计和波达方向估计则是研究的热点问题。

如图 3 所示, 当接收信号为源信号存在多径情况下的混合时, 盲源分离就成为卷积混合模型。

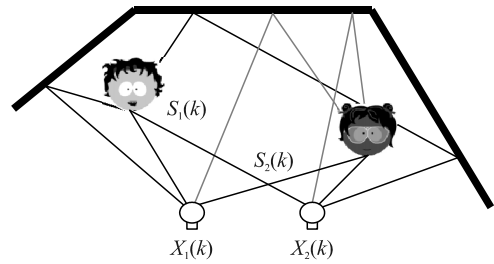


图 3 卷积混合盲源分离模型

数学模型可表示为:

$$X(k) = A * S(k) + N(k). \quad (2)$$

式中: $X_i(k) = \sum_{j=1}^n a_{ij} * S_j(k) + N_i(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{\tau=0}^{L-1} a_{ij}(\tau)$

$S_j(k - \tau) + N_i(k)$ 为第 i 个观测信号; $*$ 为卷积运算; $a_{ij}(\tau)$ 为第 j 个源信号到第 i 个天线阵元的冲激响应, 对于每个天线阵元都可以用一个 L 阶的 FIR 滤波器表示。

当源信号到达每个天线阵元存在时间延迟和衰减, 但不存在信号的多径传播时, 接收信号表现为源信号的线性延迟混合, 线性延迟混合盲源分离如图 4 所示。

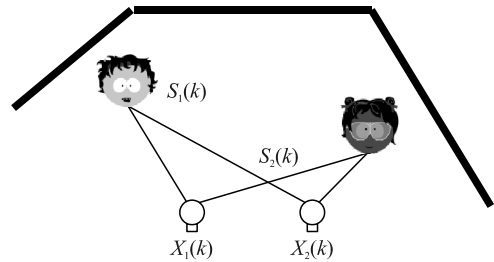


图 4 线性延迟混合盲源分离

数学模型可表示为:

$$X(k) = AS(k - \tau_{ij}) + N(k). \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; X_i(k) = \sum_{j=1}^n a_{ij}$

$S_j(k - \tau_{ij}) + N_i(k)$ 为第 i 个观测信号; a_{ij} 和 τ_{ij} 分别为第 j 个源信号到第 i 个天线阵元的幅度衰减和时间延迟。

2) 根据天线阵元数量 m 和源信号数量 n 之间的关系分别为大于、等于和少于, 可以分为超定、正定及欠定盲源分离。

3) 根据实现源信号分离所依据的源信号的特性, 可将盲源分离算法划分为独立成分分析 (independent component analysis, ICA)、稀疏成分分析 (sparse component analysis, SCA) 和非负矩阵分解 (non-negative matrix factorization, NMF) 3 类^[12, 14]。

这 3 类划分都有助于对盲源分离算法的理解, 但也易引起一定程度的混淆, 因为没有从总体上阐

明这3类划分的内在联系。实际上,超定、正定和欠定盲源分离都可能是卷积混合或瞬时混合模型。独立分量分析主要用于解决超定和正定盲源分离问题,源信号可以是卷积混合也可以是瞬时混合模型;稀疏成分分析主要用于解决欠定盲源分离问题,源信号可以是卷积混合也可以是瞬时混合模型;非负矩阵分解则对超定、正定和欠定盲源分离问题都适用,但主要适用于线性瞬时混合模型。

1.2 BSS与信号滤波处理的异同

BSS和滤波信号处理的相同点是对信号进行变换,信号滤波是在频域进行,而BSS既可能是在时域,又可能是在频域或时频域。盲源分离与滤波信号处理的目的是是一致的,都是最大化感兴趣信号与噪声信号的分隔度。

BSS与滤波信号处理的不同点是:滤波器实现观测信号中的噪声滤除,得到感兴趣信号是基于感兴趣信号与噪声的频率差异性;而盲源分离处理后得到感兴趣信号是基于源信号之间的独立性、稀疏性或非负性等,信号可以是同频或频谱混叠的。

2 盲源分离在雷达对抗中的应用研究状况

盲源分离在雷达对抗中的应用,主要包括雷达信号分选、雷达抗干扰、波达方向估计和阵列幅相一致性较准等方面,如图5所示。

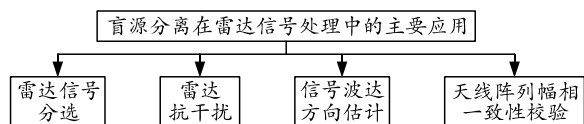


图5 盲源分离在雷达对抗中的主要应用领域

笔者总结了基于BSS的雷达信号分选、基于BSS的雷达抗干扰和基于BSS的波达方向估计3方面的研究状况和存在的问题。

2.1 基于BSS的雷达信号分选

雷达信号分选是雷达侦察系统的核心任务,其功能是从大量随机交叠的脉冲信号流中分离出各个雷达脉冲串,并选出有用的信号,其实质就是脉冲信号去交叠、去交错的过程^[15]。随着新体制雷达的不断列装,雷达侦察装备面临的电磁环境呈现出许多新的特点,破坏了传统雷达侦察系统实施信号分选可利用的信号特征,从而导致分选结果易出现增批或漏批错误,甚至不适用于新体制雷达信号分选;因此,雷达侦察信号分选技术已成为雷达侦察甚至电子战的技术瓶颈。鉴于BSS的独有特点,BSS与雷达信号分选的非合作对抗性特点十分吻合,因而

引起雷达信号分选技术领域学者们的极大兴趣。

2.1.1 BSS与雷达信号分选问题的异同

BSS理论起源于鸡尾酒会问题,分析BSS与雷达信号分选问题的异同,实质上主要是分析语音信号与雷达信号特性及2类信号接收场景的异同性,因为式(1)和(2)所示BSS模型是天线阵列接收的模型,与信号特性无关。

分析可知,BSS算法应用于语音信号与雷达信号,二者存在如下相似性:

- 1) 针对非合作目标,源信号不可直接观测,信号如何混叠不可知;
- 2) 实施信号分离依据的信号特性相似,源信号之间的统计独立性,源信号的稀疏性;
- 3) 语音信号是非平稳随机过程,雷达信号也是非平稳随机过程;
- 4) 大多数雷达信号是窄带信号,语音信号也是如此;
- 5) 声源的移动,雷达辐射源或侦察接收机的快速移动,都造成混合矩阵的变化,盲分离问题复杂化。

BSS算法应用于语音信号与雷达信号,二者存在如下差异性:

- 1) 语音信号传播是近场传播,在会议室内常面临墙壁等物体对语音信号的反射,再加上声速传播速度慢,导致语音信号盲分离模型可能是卷积模型;雷达信号传播是远场平面波传播,电磁波传播速度快,可近似看成接收信号都是直达波,BSS模型多为线性瞬时混合模型。

- 2) 雷达信号传播距离远,接收机接收到的雷达信号信噪比较低,对BSS方法是个挑战。

2.1.2 研究状况

肖文书等^[16]将BSS算法引入雷达信号分选之中,目的是从雷达阵列接收的信号(包括雷达杂波以及所需目标的回波信号,接收机热噪声)中提取所需目标的回波信号,所研究问题是超定和正定的。周刚等^[17]提出使用负熵最大化算法进行雷达信号的盲抽取,可以抗突发脉冲干扰及降低噪声。钟兆根等^[18]研究了正定情况下雷达侦察信号的BSS方法。陈晓军^[19]基于ICA开展了雷达信号欠定BSS研究,该方法对等间隔分段的观测信号应用ICA获得多个子混合矩阵,然后对其剔除不属于原混合矩阵的元素,最后利用C均值聚类法获得对混合矩阵的精确估计。蔡智富^[20]应用BSS算法仿真研究了雷达信号的分选问题,研究问题是正定的。温媛媛等^[21]用卷

积混合 BSS 算法来分离雷达系统接收的信号,把卷积混合的干扰信号和有用信号分离开来,以实现雷达系统抗干扰的目的,所针对的 BSS 问题是正定的。嘉娟^[22]基于多种 BSS 算法研究了雷达信号的分选问题,结果表明这些算法在处理混叠的雷达信号时有良好的分离效果。张瑜等^[23]应用 FastICA 方法仿真研究了雷达信号与加性噪声信号的分离问题,所研究问题是正定的。贾亮等^[24]研究了相控阵雷达信号的正定 BSS 问题。张一川等^[25-26]分别研究了线性瞬时混合和卷积 BSS 算法在雷达信号分选中的应用,研究中未涉及雷达信号数量估计问题,特别是卷积混合模型下,如何确定信号数量,目前国内外研究极少。Sha 等^[27]采用稀疏分量分析算法对跳频信号进行分选研究,所针对的 BSS 模型是欠定线性瞬时混合模型。汤小为等^[28]采用基于非圆复数 FastICA (NC-FastICA) 的 BSS 算法对 MIMO 雷达信号进行分选,为了满足 BSS 算法的应用条件,提出了一种对多个位置、不同视角的雷达信号进行采集的侦察方法,得到了一个可分离的满秩混合矩阵。Cheng 等^[29]针对雷达信号分选的欠定 BSS 问题,基于时频单元点检测对观测信号进行处理,然后应用 K 均值聚类法进行混合矩阵估计。王红卫等^[30]针对雷达信号分选问题,通过 Givens 变换构造高阶分离矩阵,将适用于 2 路信号的基于三阶循环量的循环平稳度 BSS 算法拓展到适用于具有不同循环平稳频率的多路雷达信号, BSS 模型是单通道模型。翁国秀等^[31]针对欠定条件下的雷达信号分选问题,提出一种基于时频单源点检测的雷达信号盲分选算法。王彬等^[32]引入同步累加平均降噪结合信号均衡、平滑处理算法,使得 ICA 算法可在低信噪比情况下对雷达信号进行分选。骆伟林等^[33]针对传统 ICA 算法存在收敛速度慢、分离性能不高的问题,将混沌映射策略与自适应爆炸半径相结合,提出一种基于混沌自适应烟花算法的 BSS 算法,并应用于雷达信号分选问题。Luo 等^[34]针对烟花算法的性能瓶颈和易陷入局部极值的问题,提出了一种混沌映射方法,基于不同的混沌映射方法,提出了一种用于雷达信号分选的新型混沌防火墙算法。

综合分析发现,目前 BSS 理论在雷达信号分选中应用,主要是理论研究阶段,所用的算法主要是线性瞬时混合类 BSS 算法,少数涉及卷积 BSS 算法,欠定 BSS 算法在雷达信号分选中的应用研究极少。另外,仿真中所用的雷达信号,通常一部雷达有一种信号样式,而实际一部现代雷达通常有多种

工作模式和信号样式,如何将不同时间段分离得到的一部雷达信号的不同信号样式归属于同一部雷达,尚无文献提及。

2.2 基于 BSS 的雷达抗干扰

现代雷达所处的电磁环境愈发复杂。如何有效地提高雷达的抗干扰性能,是雷达领域专家所面临的艰巨任务。干扰可能从雷达波束的副瓣或主瓣方向进入,分别形成副瓣干扰或主瓣干扰。当前,先进的相控阵雷达凭借副瓣对消、副瓣匿影、频率捷变、低副瓣/超低副瓣等技术可以有效抑制远距离支援副瓣干扰,但如何对抗主瓣干扰还很困难,对于单纯抗自卫式干扰已有较为成熟的对抗措施,但未涉及近主瓣干扰^[35]。唐斌等^[36]指出多种干扰方式并存已逐渐成为现代雷达干扰的主要手段,而现有抗干扰方法只能单独对抗自卫式干扰或者单个近主瓣干扰,但面对同时存在自卫式干扰和多个近主瓣干扰这种复杂电磁环境无能为力,如何抑制复合式干扰具有极高的军事意义和工程价值。

鉴于 BSS 的独特优势,学者们考虑从盲分离角度进行干扰抑制,其基本思想是“剔除”主要为干扰的分离通道,保留主要为目标的分离通道。黄高明等^[37]首次探索了基于 BSS 的雷达回波信号和干扰信号分离思路,开展了仿真验证。肖鹏^[38]仿真研究了基于 FastICA 算法的雷达抗干扰方法。陈超^[39]提出了基于分离矩阵平滑估计的频域 BSS 算法,并基于此算法仿真研究了雷达回波和干扰信号的分离问题。王文涛等^[40]给出了 BSS 应用于雷达抗主瓣干扰的信号模型,在此基础上提出了均匀噪声环境中,基于负熵最大化的 FastICABSS 算法,并用其分离接收到的干扰混合信号,最后脉压找出目标信号。周青松等^[41-42]综合运用 BSS 和分数阶傅里叶变换来对抗主瓣干扰,前者提出了分数阶傅里叶变换后置降噪的盲分离抗主瓣干扰算法,相比较自适应差分进化算法在干扰抑制比上有一定提高,后者解决了 BSS 信号相位模糊问题和强干扰环境下分数阶域峰值点被干扰湮没问题。张池等^[43]预先估计信源数,再应用自适应差分 BSS 算法对雷达干扰信号进行抑制。王瑜等^[44]提出基于 BSS 的抗密集假目标干扰的方法,比较了对角化盲源分离算法 (JADE) 和 FastICA 2 种 BSS 方法对密集假目标和回波信号的分离效果。李欣等^[45]分析了正交极化辅助天线扩展接收通道的可行性,建立了通道扩展后的雷达接收信号模型,研究了回波与干扰信号的可分离性,基

于最大信噪比 BSS 算法对干扰进行抑制。郭晓乐等^[46]基于四阶累积量的特征矩阵近似联合 JADE, 首先在目标和干扰所在的大致方位形成 2 个和波束数据, 然后利用 JADE 算法对 2 个和波束数据进行处理, 通过多脉冲相干积累脉冲压缩原理分离出目标信号。周必雷等^[47]提出了基于盲分离的空时联合处理抗复合干扰方法, 旨在抑制兼有自卫式干扰和多个近主瓣干扰这类复合干扰。吕晓德等^[48]针对外辐射源雷达接收信号包含多个同频发射基站的直达波和多径杂波干扰的问题, 提出了一种基于卷积混合模型的 BSS 算法来抑制同频基站的杂波干扰。周胜文等^[49]针对 BSS 抗主瓣干扰的问题, 提出多目标雷达回波和多干扰样式的 BSS 模型, 并基于快速独立分量分析算法分析雷达目标回波与相参干扰的 BSS 效果。王志刚等^[50]针对传统抗干扰算法难以有效抑制雷达主瓣干扰的问题, 提出一种基于主辅通道的 BSS 抗主瓣干扰算法, 利用 JADE 算法分离主瓣目标和干扰混合信号, 基于时域峰均值功率比评估指标实现目标和干扰通道分类。杨益超^[51]在分布式结构雷达系统背景下, 选择其中一个接收雷达作为实施 BSS 的主通道, 将该雷达接收面阵接收到的目标信号和干扰的混合信号作为 BSS 的源信号, 基于 JADE 算法对其进行信号分离。

分析发现, BSS 抗主瓣干扰算法还存在许多不足^[52], 如分离信号各分量排列顺序上的不确定性使得分离出来的回波信号和干扰信号存在幅度和相位模糊的问题; 对源信号个数未知且数目动态变化或者是观测信号个数小于源信号个数的欠定 BSS 方法研究不足; 对基于不同目标函数的算法在实际环境中对干扰杂波分离的全局收敛性、鲁棒性和稳定性的研究不足; 现有的 BSS 算法大都假设无噪声或把噪声看成一个独立源信号处理, 而实际中雷达噪声种类较多, 如何将无噪声或高斯白噪声条件下的 BSS 算法推广到一般的噪声条件下, 在理论研究中还是空白。

2.3 基于 BSS 的波达方向估计

波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计问题是确定同时处在空间某区域内感兴趣信号的来波方向。DOA 估计在通信、雷达、声呐、医学成像、地震勘探、伞兵集结等领域有着非常广泛的应用。

对空间信号的 DOA 估计方法研究由来已久, 经典的方法包括基于子空间分解的方法如 MUSIC、ESPRIT 以及极大似然方法等。近年来, 稀疏重构

方法被引入阵列信号处理领域, 发展了几种稀疏重构类阵列测向算法, 如匹配追踪类 (match pursuit, MP) 算法、 l_p 范数类算法以及贝叶斯稀疏学习类 (sparse Bayesian learning, SBL) 算法。ICA 类测向方法将 ICA 与 DOA 估计结合起来, 开辟了一条 DOA 估计的新途径, 可以解决非欠定条件下的 DOA 估计问题。Sawada 等^[53]针对均匀线阵, 第一次给出了一种基于 ICA 的 DOA 估计方法, 首先利用 ICA 方法求得分离矩阵, 然后利用均匀线阵阵列流形矩阵的特殊结构及其与分离矩阵的内在联系求解出流形矩阵中包含的 DOA 信息。针对存在阵列误差的情形, Shimada 等^[54]提出了一种基于 ICA 的互耦校正方法。孙正鼐等^[55]研究了基于 FastICA 的波达方向估计方法。赵立权^[56]对复数 ICA 算法进行改进, 并应用到波达方向估计中, 针对盲波束形成算法存在的问题进行了改进, 提出了固定点盲波束形成算法。赵佳等^[57]提出了一种基于 JADE 算法的盲 DOA 估计方法, 通过 JADE 算法对阵列流形矩阵进行估计, 结合多径环境下阵列流形矩阵的特点实现信号的 DOA 估计。胡增辉等^[58]针对均匀圆阵的情况又提出了类似的方法。Iman^[59]在其博士论文中系统研究了基于 BSS 的波束形成和波达方向估计方法。Ishida 等^[60]提出了一种基于均值漂移的 BSS 方法, 并利用时频分解进行信号 DOA 估计。阮宗利^[61]在信号方向未知的情况下, 将波束形成看作一类特殊的盲信号分离问题, 研究了基于 ICA 技术的波束形成方法。陈一飞^[62]研究了基于联合近似对角化 BSS 算法的 DOA 估计方法。Либеровский 等^[63]基于 BSS 算法实现了 2 个信号的 DOA 估计。黄曼露^[64]研究了基于时频掩码的欠定 BSS 算法 DOA 估计方法分析易知, 基于 ICA 的 DOA 估计方法只能适用于超定/正定混合条件, 无法解决欠定条件下的 DOA 估计问题。欠定 BSS 算法在 DOA 估计中的应用研究基本尚属空白。

3 面临的主要挑战分析

自上世纪末期开始研究以来, BSS 算法在理论和应用研究方面都获得了长足发展。学者们逐渐认识到, 对于不同的应用领域, 应该对算法提出不同的具体要求, 例如算法的鲁棒性、稳定性、实时性和精确性等, 使 BSS 算法的研究更有针对性。查阅大量文献分析认为, BSS 及其在雷达对抗领域中应用和研究方面, 存在以下突出问题亟待研究解决。

3.1 算法实时性和非理想阵列影响方面

1) 大多数 BSS 算法都是离线或批处理操作的, 这种操作在雷达信号分选中能发挥很大作用, 但对于实时性要求很高情况下的实时信号侦察、雷达抗干扰、DOA 估计等应用, 还存在一定限制, 需大力研究在线处理的 BSS 算法。

2) 现有 BSS 算法都是基于理想的天线阵列, 没有考虑天线阵列接收信号存在幅相不一致性的情况, 此情况下 BSS 算法效果如何, 目前尚无研究。

3.2 信号特性挖掘利用方面

1) 解决欠定 BSS 问题, 目前主要基于源信号的稀疏性, 尽管源信号非充分稀疏在一定条件下也可以分离, 但是其分离效果会降低, 特别是随着源信号个数的增多, 信号分离精度会下降, 因此如何提高信号的稀疏度, 在源数较多时的 BSS 方法都有待研究。

2) 在非充分稀疏混合信号中, 主导信号个数的估计对欠定 BSS 具有重要意义, 是一个研究难点。在复杂电磁环境下, 源信号在时域与频域中极易产生严重的混叠现象, 甚至会出现观测到的混合信号数量, 少于时频域内真实源信号数量的状况。这种条件下的 BSS 算法有待进一步研究。

3) 非负矩阵分解(NMF)是解决部分欠定 BSS 问题的一个很有前途的研究工具, NMF 如何保证分解的唯一性以及算法的收敛性有待进一步研究。

3.3 算法适用的噪声特点方面

1) 噪声对 BSS 算法性能的影响及其抑制方法是盲信号分离能够在实际中应用尚待解决的重要方面。

2) 现有 BSS 算法都是针对高斯白噪声背景开发的, 实际中由于天线阵元之间的互耦、噪声相关性以及各通道之间的增益、噪声不一致性等因素影响, 阵列所输出的信号通常是淹没在色噪声之中的, 色噪声下的 BSS 算法仍是研究的空白。

3) 如何将无噪声或高斯白噪声条件下的 BSS 算法推广到一般噪声条件下, 对于实际复杂环境条件下的雷达信号分选、雷达抗干扰和波达方向估计, 都尚需理论上的突破。

3.4 部分关键新算法方面

1) 基于观测信号扩维的欠定 BSS 解决思路, 对于欠定 BSS 问题, 以及接收信号中存在同频或频谱混叠情形是否有效, 尚需进一步研究。

2) 在实际中, 源信号并非都是统计独立的, 而现有 BSS 算法多是基于源信号的统计独立性实现源信号的分离。针对相关信源的 BSS 研究十分有限。

3) 现实中辐射源信号或混合过程通常有一些可资利用的先验信息, 考虑如何挖掘源信号或混合过程的先验信息, 将模型中的 BSS 问题转换为半盲分离问题, 以此构建鲁棒性更强、适用场景更广泛的信号分离模型, 进而提升模型在复杂环境下对源信号的分离效果与处理能力。

4) 解决欠定 BSS 问题, 通常需要用到聚类算法, 非合作条件下不同雷达辐射源信号的聚类形状不能确定, 而常用的一些聚类算法具有某些形状偏见, 因此用于雷达信号分选领域的聚类算法应具有发现任意形状、大小聚类的能力。

3.5 算法在领域问题应用方面

1) 许多实际信号环境是动态变化的, 如信号源或接收设备的移动, 源信号样式或参数的变化, 天线接收过程中不断有新的信号源加入或退出等情形, 而 BSS 算法在这类动态变化信号环境中的适用性尚待深入研究。

2) BSS 在雷达信号处理中的研究, 目前多是开展仿真验证, 还需通过实验验证算法的可行性和效果, 并探索相应的改进办法。

3) BSS 在雷达信号分选中的应用, 主要是基于非欠定线性瞬时混合 BSS 算法, 实际上欠定 BSS 与雷达对抗侦察实际情形更加吻合, 需加大此方面研究。实际中一部现代雷达通常有多种信号样式, 如何将不同时间段用 BSS 算法分离得到的一部雷达信号的不同信号样式归属于一部雷达, 需开展研究。

4) BSS 技术应用用于雷达主瓣抗干扰领域时, 需要解决信号分离后各分量排序不确定所引发的问题, 即分离得到的回波信号与干扰信号会出现幅度、相位模糊的情况; 同时, 针对基于不同目标函数构建的分离算法, 其在真实应用场景中对干扰与杂波的分离效果, 在全局收敛性、鲁棒性以及稳定性等方面, 仍有待开展系统性、全面化的研究。5) 欠定 BSS 算法在信号波达方向估计中的应用研究基本尚属空白, 需大力加强研究。

4 结论

BSS 技术由于其其在混叠信号分离方面的特殊优势, 使得其具有很高的研究价值和广泛的应用前景, 相关理论体系日益完善, 人们更加注重实际问题的

适用性。由于实际问题的复杂性, BSS 理论尚有一系列问题亟待解决。笔者对 BSS 理论在雷达对抗领域中应用的研究现状进行了总结, 分析提出了一些尚待解决的技术问题, 对于该领域学者的研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] SAWADA H, ONO N, KAMEOKA H, et al. A Review of Blind Source Separation Methods: Two Converging Routes to ILRMA Originating from ICA and NMF[J]. *SIP*, 2019, 8(12): 1-14.
- [2] MA S, ZHANG H, MIAO Z. Blind source separation for the analysis sparse model[J]. *Neural Computing and Applications*, 2021, 33: 8543-8553.
- [3] WILDEBOER R R, SAMMALI F, SLOUN R J G, et al. Blind Source Separation for Clutter and Noise Suppression in Ultrasound Imaging: Review for Different Applications[J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(8): 1497-1512.
- [4] WANG C C, ZENG Y H, LI Z P, et al. Accurate Signal Source Number Estimation using Eigenvalue Quadratic Diagonal Loading Method[J]. *Sensors and Materials*, 2022, 34(6): 2371-2389.
- [5] WANG C C, LIU M Q, CHEN Q, et al. Automatic Digital Modulation Recognition in the Presence of Alpha-stable Noise[J]. *Physical Communication*, 2020, 43: 1-8.
- [6] WANG C C, JIANG L, ZENG Y H, et al. Underdetermined Mixing Matrix Estimation by Comprehensive Application of Cluster Validity Indexes[J]. *China Universities of Posts and Telecommunications*, 2020, 27(6): 73-86.
- [7] WANG C C, ZENG Y H, WANG L D. Source Enumeration Method Combining Gerschgorin Circle Transform and Generalized Bayesian Information Criterion in Large-scale Antenna Array[J]. *Applied Computational Electromagnetic Society*, 2020, 35(7): 758-769.
- [8] ADAL T, JUTTEN C, YEREDOR A, et al. Source Separation and Applications[J]. *Signal Processing*, 2014, 5: 16-17.
- [9] SYED M N, GEORGIEV P G, PARDALOS P M. A Hierarchical Approach for Sparse Source Blind Signal Separation Problem[J]. *Computers & Operations, Research*, 2014, 41: 384-398.
- [10] 黄知涛, 王翔, 彭耿, 等. 欠定盲源分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [11] 王川川, 曾勇虎. 欠定盲源分离算法研究现状及展望[J]. *北京邮电大学学报*, 2018, 41(6): 103-109.
- [12] 余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] PUIGT M. A Very Short Introduction to Blind Source Separation[R]. *Hellas Institute of Computer Science*, 2011.
- [14] WILDEBOER R R, SAMMALI F, SLOUN R J G, et al. Blind Source Separation for Clutter and Noise Suppression in Ultrasound Imaging: Review for Different Applications[J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(8): 1497-1512.
- [15] 司锡才, 司伟建, 张春杰, 等. 超宽频带被动雷达寻的技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [16] 肖文书, 张兴敢, 都思丹. 雷达信号的盲分离[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(1): 38-43.
- [17] 周刚, 韦忠义. 基于负熵最大化盲抽取的雷达信号分选研究[J]. *电讯技术*, 2007, 47(4): 174-177.
- [18] 钟兆根, 张立民, 武恒州. 多传感器雷达侦察信号分选新方法研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(6): 994-997.
- [19] 陈晓军. 欠定条件下混合信号盲分离算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [20] 蔡智富. 脉压雷达信号的识别与参数估计算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [21] 温媛媛, 陈豪. 基于雷达系统抗干扰的卷积盲分离算法研究[J]. *现代雷达*, 2012, 34(4): 40-44.
- [22] 嘉娟. 脉间波形变换雷达信号分选理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [23] 张瑜, 刘莹, 房少娟. 复杂电磁环境下的雷达信号分离方法[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 40-42.
- [24] 贾亮, 田雨翔. 基于 LPFT 的相控阵雷达信号盲分离[J]. *电子器件*, 2014, 37(3): 445-449.
- [25] 张一川. 盲源分离算法及其在雷达信号分选中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [26] 刘锋, 黄宇, 王泽众, 等. 复杂调制信号截获、分选与识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [27] SHA Z C, HUANG Z T, ZHOU Y Y, et al. Frequency-hopping Signals Sorting based on Underdetermined Blind Source Separation[J]. *IET Communications*, 2013, 7(14): 1456-1464.
- [28] 汤小为, 唐波, 汤俊. 集中式多输入多输出雷达信号盲分离算法研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(5): 679-685.
- [29] CHENG C, LIU L M, HAN Z Z. Time Frequency Single Source Point Detection Based Method for Radar Signal Sorting[J]. *Control and Automation*, 2015, 8(4): 413-420.
- [30] 王红卫, 范翔宇, 陈游, 等. 基于循环平稳度准则的多路雷达信号识别算法[J]. *兵工学报*, 2016(4): 661-669.
- [31] 翁国秀, 徐学红. 基于时频单源点检测的雷达信号的盲分选[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2017, 29(1): 42-48.
- [32] 王彬, 高冰, 谷沛尚, 等. 基于 FastICA 的低信噪比雷达信号分选算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019(11): 1555-1560.
- [33] 骆伟林, 金宏斌, 李浩, 等. 基于混沌自适应烟花算法的雷达信号盲源分离[J]. *系统工程与电子技术*,

- 2020(11): 2497-2505.
- [34] LUO W L, JIN H B, LI H, et al. Optimal Performance and Application for Firework Algorithm Using a Novel Chaotic Approach[J]. IEEE Access, 2020, 8: 120798-120817.
- [35] 王志刚, 朱灿, 洪畅, 等. 基于主辅通道的盲源分离抗主瓣干扰算法[J]. 雷达与对抗, 2019, 39(4): 10-14.
- [36] 唐斌, 赵源, 蔡天一, 等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 623-639.
- [37] 黄高明, 杨绿溪, 何振亚. 一种基于盲源分离的雷达抗干扰技术[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(6): 94-99.
- [38] 肖鹏. SAR 抗压制性干扰方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [39] 陈超. 复杂电磁环境下的频域盲源分离算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [40] 王文涛, 张剑云, 李小波, 等. FastICA 应用于雷达抗主瓣干扰算法研究[J]. 信号处理, 2015, 31(4): 497-503.
- [41] 周青松, 王文涛, 王珽, 等. 盲分离算法和 FRFT 联合抗雷达主瓣干扰技术研究[J]. 信号处理, 2015, 31(8): 1004-1011.
- [42] 王瑜, 李小波, 周青松, 等. 联合 BSS 和 FRFT 的雷达抗主瓣干扰新方法[J]. 现代雷达, 2016, 38(7): 72-77.
- [43] 张池, 王峰, 马正颖. 基于认知型盲源分离的雷达主瓣干扰抑制技术研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(8): 32-36.
- [44] 王瑜, 李小波, 单良, 等. 基于盲源分离的抗密集假目标干扰技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(2): 15-19.
- [45] 李欣, 王春阳, 付孝龙, 等. 极化通道扩展和盲源分离联合抗移频干扰技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(4): 731-737.
- [46] 郭晓乐, 邱炜, 李向阳, 等. 基于 JADE 盲源分离的主瓣抗干扰算法研究[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(4): 47-51.
- [47] 周必雷, 李荣锋, 陈风波, 等. 基于盲分离的空时联合处理抗复合干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2393-2402.
- [48] 吕晓德, 张汉良, 刘忠胜, 等. 基于 LTE 信号的外辐射源雷达同频基站干扰抑制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2123-2130.
- [49] 周胜文, 石俊, 周云生. 基于盲源分离的相参干扰研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(6): 56-61.
- [50] 王志刚, 朱灿, 洪畅, 等. 基于主辅通道的盲源分离抗主瓣干扰算法[J]. 雷达与对抗, 2019, 39(4): 10-14.
- [51] 杨益超. 分布式雷达协同抗干扰与目标角度估计算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [52] 范文泉. 基于盲源分离算法的抗主瓣干扰技术深化研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2019.
- [53] SAWADA H, MUKAI R, ARAKI S, et al. Multiple source localization using independent component analysis[C]. Antennas and Propagation Society International conjunction with the 2005 USNC/URSI National Radio Science Meeting. USA: Washington, DC, 2005: 411-414.
- [54] SHIMADA Y, YAMADA H, YAMAGUCHI Y. Blind Array Calibration Technique for Uniform Linear Array Using ICA[C]. 2007 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2007). JAPAN: Niigata, 2007: 1-4.
- [55] 孙正鼎, 肖芳, 张虹. 一种基于 FastICA 的波达方向估计新方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(6): 1510-1512.
- [56] 赵立权. ICA 算法及其在阵列信号处理中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [57] 赵佳, 杨景曙, 全家保. 基于 JADE 算法的盲 DOA 估计[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 91-97.
- [58] 胡增辉, 朱炬波, 何峰, 等. 互耦条件下均匀线阵 DOA 盲估计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 382-387.
- [59] IMAN M. Array Signal Processing for Beamforming and Blind Source Separation[D]. Victoria, Canada: Doctoral Thesis of University of Victoria, 2013.
- [60] ISHIDA R, SEKIKAWA M, MITSUKURA Y, et al. Microphone array for multi-source direction finding and separation based on mean shift[C]. 2015 10th Asian Control Conference (ASCC). Malaysia: Kota Kinabalu, 2015.
- [61] 阮宗利. 盲源分离技术研究及在盲波束形成中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [62] 陈一飞. 盲源分离在雷达侦察中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [63] ЛИБЕРОВСКИЙ Ю, ЧИРОВД С, ПРИПУТИНВ С. Development of the Two Real Signals Blind Separation Method using Fourth-order Cumulants[J]. Bulletin of the South Ural State University, 2020, 13(2): 43-53.
- [64] 黄曼露. 基于双麦克风的欠定盲源分离算法研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.