

盲源分离通信抗干扰技术与实践

姚富强¹, 于淼¹, 郭鹏程^{1,2}, 顾淼淼^{1,3}

(1. 国防科技大学第六十三研究所, 江苏 南京 210007;
2. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073;
3. 中国人民解放军 31609 部队, 江苏 南通 226141)

摘要: 针对宽频段压制干扰威胁以及频谱资源与通信抗干扰能力之间的固有矛盾, 提出在扩谱抗干扰基础上增加统计域维度的方法, 推动通信抗干扰由“硬抗”向“容扰”转变。盲源分离抗干扰技术利用通信信号和干扰信号的统计特性差异进行信号分离, 可在不增加频谱资源条件下提高通信抗干扰能力。为认识和完善盲源分离抗干扰从理论算法到工程实践的发展过程, 阐述盲源分离通信抗干扰技术的基本原理, 重点介绍多通道盲源分离、单通道盲源分离等关键技术, 分析盲源分离通信抗干扰技术的主要特点和存在的问题, 最后指出该领域的发展重点。

关键词: 无线通信; 通信抗干扰; 盲源分离; 独立分量分析; 经验模态分解

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023202

Blind source separation communication anti-jamming technology and practice

YAO Fuqiang¹, YU Miao¹, GUO Pengcheng^{1,2}, GU Miaomiao^{1,3}

1. The Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China
2. The College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
3. Unit 31609 of PLA, Nantong 226141, China

Abstract: Aiming at the threat of broad frequency band suppressing jamming and the inherent contradiction between spectrum resources and communication anti-jamming ability, a method was proposed to add the statistics domain dimension on the basis of spread spectrum anti-jamming, which promoted the transformation of communication anti-jamming from hard anti-jamming to accommodate the jamming. The statistical characteristics difference between communication signal and jamming signal was utilized by blind source separation (BSS) communication anti-jamming technology to separate signals, which could improve the communication anti-jamming ability without increasing spectrum resources. To understand and improve the development process of BSS communication anti-jamming (BSSCA) from theory and algorithm to engineering practice, the basic principle of BSSCA was described, the key technologies such as multi-channel BSS and single channel BSS were emphasized. The main characteristics and existing problems of BSSCA were analyzed. Finally, the development priorities of this field were pointed out.

Keywords: wireless communication, communication anti-jamming, blind source separation, independent component analysis, empirical-mode decomposition

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-10-12

通信作者: 于淼, yumiao17@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61179006); 国家社会科学基金资助项目 (No.2022-SKJJ-B-112)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61179006), The National Social Science Foundation of China (No.2022-SKJJ-B-112)

0 引言

由于信道的开放特性,无线通信容易受到无意和有意干扰^[1]。在战术通信领域,“通得上”和“抗得住”是 2 个永恒主题,“抗得住”就是要保证在恶劣电磁环境和强电子对抗条件下的可靠传输^[2]。通信抗干扰大概经历了扩谱抗干扰和智能抗干扰 2 个发展阶段,目前正在向内生抗干扰方向发展^[3]。

复杂电磁环境中,通信信号和干扰信号时频混叠,该场景与语音信号处理领域的“鸡尾酒会问题”相似。盲源分离致力于解决“鸡尾酒会问题”,旨在分离出共存的各语音信号,已成为当前信号处理和神经网络领域的研究热点。

盲源分离(BSS, blind source separation)是指在未知或少量先验信息情况下,仅利用观测混合信号对源信号和混合情况进行估计的理论与技术^[4-5]。盲源分离起源于 20 世纪 80 年代,Hérault 和 Jutten^[6]提出了著名的 H-J 算法,开创性地进行了信号盲分离研究工作。此后,学术界针对源信号独立性等理论和实践问题开展了大量研究^[4-32],形成了独立分量分析或独立成分分析(ICA, independent component analysis)等理论^[4-8],目前 ICA 已经成为 BSS 的主要解决方法。盲源分离已在生物医学^[33-35]、语音^[30-32,36-38]、图像^[39]、视频^[40]和水声^[41-42]等信号处理领域得到广泛关注。由于无线信号分离和语音信号分离的相似性以及“盲”的优点,盲源分离技术被迅速用于无线通信侦察领域^[43-45],同时促进了盲源分离抗干扰技术的发展^[46-57]。

根据接收通道数目 m ,盲源分离可以分为多通道($m > 1$)和单通道($m = 1$)盲源分离。再根据源信号数目 n 与 m 的关系,多通道盲源分离又可分为超定

($m > n$)、适定($m = n$)和欠定($2 \leq m < n$)几种情况。单通道盲源分离原属于欠定盲源分离,但是,由于接收端仅有一个接收通道,基于矩阵的多通道盲源分离理论框架不再适用。鉴于单通道设备的普遍性,该技术在实际应用中具有非常重要的意义。因此,本文将单通道盲源分离抗干扰技术单独列出。

扩谱抗干扰以频谱资源为代价,其抗干扰能力与频谱资源之间存在固有矛盾,尤其在抗宽频段压制干扰时,这种矛盾更加突出。智能抗干扰技术需要认知电磁环境及协调抗干扰策略,大幅增加了勤务信令所需的时频资源开销,面临信令开销与系统效率之间的突出矛盾。实际应用中,以上两类矛盾往往难以调和,严重制约系统性能的提高。盲源分离在扩谱抗干扰基础上增加统计域维度,将时频混叠的通信信号与干扰信号分离开来,可在不增加频谱资源和勤务信令条件下提高通信抗干扰能力。盲源分离为解决以上两类矛盾提供了有效技术途径,推动通信抗干扰由“硬抗”向“容扰”发展。

1 盲源分离通信抗干扰基本原理

结合无线通信系统,盲源分离通信抗干扰技术原理如图 1 所示。

图 1 中,源信号包括 k 个通信信号和 $n - k$ 个干扰信号,即

$$\mathbf{u}(t) = [s_1(t), \dots, s_k(t), J_1(t), \dots, J_{n-k}(t)]^T \quad (1)$$

源信号 $\mathbf{u}(t)$ 经无线信道传播后,接收端获得接收信号 $\mathbf{x}(t)$ 可写为

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T \quad (2)$$

其中, m 为天线数目。式(2)所示的接收信号为通信

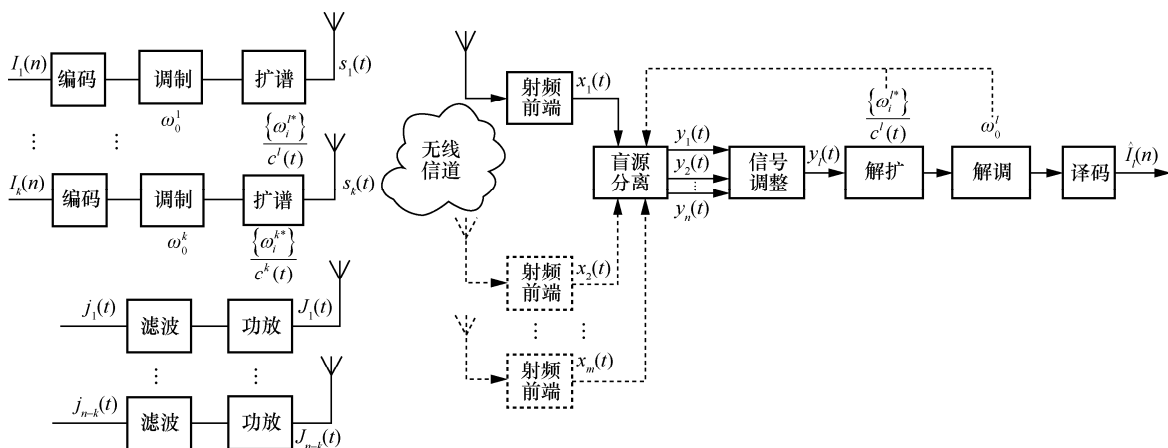


图 1 盲源分离通信抗干扰技术原理

信号和干扰信号的混合形式。由于接收含有干扰信号成分，通信性能将受到影响。图 2 以理想的线性瞬时混合为例，对图 1 中的信号混合和分离情况进行说明。

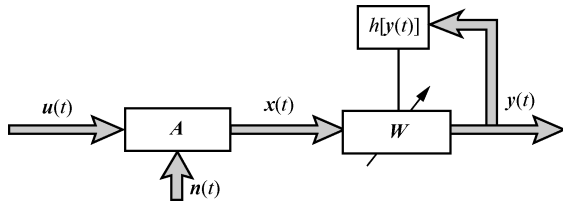


图 2 盲源分离主要流程

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}s_1(t) + \dots + a_{1k}s_k(t) + a_{1k+1}J_1(t) + \dots + a_{1n}J_{n-k}(t) \\ a_{21}s_1(t) + \dots + a_{2k}s_k(t) + a_{2k+1}J_1(t) + \dots + a_{2n}J_{n-k}(t) \\ \vdots \\ a_{m1}s_1(t) + \dots + a_{mk}s_k(t) + a_{mk+1}J_1(t) + \dots + a_{mn}J_{n-k}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_m(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)表明，每路接收信号 $x_i(t)$ ($1 \leq i \leq m$) 均为 n 个源信号的线性组合，同时含有干扰和其他信号成分。

如图 2 所示，对于式(3)和式(4)所示的混合信号，盲源分离通过极大化 $h[y(t)]$ 引导分离矩阵 W 迭代，使 W 逼近混合矩阵的逆矩阵 ($W \approx A^{-1}$)，从而实现信号分离，如式(5)所示。

$$y(t) = Wx(t) = W[Au(t) + n(t)] \approx u(t) + n'(t) \quad (5)$$

将式(5)写成向量形式，可以得到

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_k(t) \\ y_{k+1}(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_k(t) \\ J_1(t) \\ \vdots \\ J_{n-k}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n'_1(t) \\ \vdots \\ n'_k(t) \\ n'_{k+1}(t) \\ \vdots \\ n'_n(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中，每一路分离信号 $y_i(t)$ ($1 \leq i \leq n$) 对应一个源信号，与式(4)对比发现，信号得到有效分离。

实际应用中，式(6)所示的分离信号和源信号的次序对应关系具有不确定性，还需进行相关处理。图 1 中的信号调整模块从分离信号中识别出有用信号并调整其幅度。设第 l 个信号为目标信号，后续模块对 $y_l(t)$ 解扩、解调、译码以恢复用户信息 $\hat{I}_l(t)$ 。当接收端具有多个接收通道时，可通过多通道盲源分离技术进行分离；当接收端仅有一个接收通道时，可采用单通道盲源分离技术。接收端还可利用载频、跳频图案、直扩码等先验信息进行半盲源分

图 2 中， A 为接收信号混合矩阵， W 为分离矩阵， $y(t)$ 为分离信号， $h[y(t)]$ 为反映分离程度的目标函数，接收信号 $x(t)$ 可表示为

$$x(t) = Au(t) + n(t) \quad (3)$$

其中， $A = \{a_{ij}\}$ ， a_{ij} 为混合系数，反映了第 j 个源信号到第 i 根天线传播信道的衰减情况； $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)]^T$ 为噪声信号。为便于观察，将式(3)写成向量形式，可以得到

离，以进一步提高分离性能。盲源分离主要受信号统计特性影响，与具体的通信技术体制不形成直接关系，对于未采用扩谱通信技术的场景，去除图 1 中的扩谱和解扩模块依然适用。

2 盲源分离通信抗干扰主要关键技术

结合无线通信实际情况，根据使用需求，重点讨论多通道和单通道盲源分离抗干扰等关键技术。

2.1 多通道盲源分离抗干扰技术

多通道盲源分离技术发展相对完善，但考虑背景噪声、信道衰落及天线数目等因素，需要关注降噪处理、卷积混合信号盲源分离及欠定盲源分离等问题。

2.1.1 小波降噪处理

独立分量分析通常先对混合信号进行白化处理，使之互不相关，再以独立性为目标函数，引导信号分离^[5-6]。当混合矩阵各行线性相关性增大时，白化处理会放大噪声，对后续信号分离产生不利影响。因而，在信号分离前，需要对接收信号进行降噪处理。小波变换作为有效的降噪手段，可为盲源分离抗干扰提供帮助。

信号 $x(t)$ 的连续小波变换的数学表达式为^[58]

$$\mathcal{T}[x(t)] = |a|^{-\frac{1}{2}} \int x(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

其中， $\mathcal{T}[x(t)]$ 为小波变换系数， a 为缩放因子， b 为平移因子， $\varphi(\cdot)$ 为小波基函数。小波变换可以反映信号不同频率成分的细节特征，正信噪比情况

下, 信号的小波系数较大, 而噪声的小波系数较小。

根据阈值选取规则确定门限值, 保留(硬阈值方法)或者收缩(软阈值方法)超过门限值的小波系数, 最后利用处理后的小波系数重构信号即可消除或减小噪声^[58]。

但是, 小波降噪性能受小波基、阈值选取规则、分解层数、阈值处理方法等参数影响, 参数空间巨大。文献[59]结合理论分析和仿真实验, 明确了适合跳频信号盲源分离抗干扰的降噪参数集, 当干信比等于 10 dB 时, 小波降噪盲源分离较未降噪盲源分离容忍噪声强度提高了约 2.5 dB。

2.1.2 卷积混合信号盲源分离

当无线信道存在多径衰落时, 接收信号为源信号的卷积混合形式。参考线性瞬时混合模型图^[60], 卷积混合信号盲源分离过程如图 3 所示。

图 3 表明, 在混合过程中, 信号不但存在幅度衰减, 还出现多条传播路径, 接收信号可表示为^[4]

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K a_{ij}(\tau_k) s_j(t - \tau_k) + n_i(t) \quad (8)$$

其中, 每个源信号 $s_j(t)$ 均有 K 条路径, 每径的幅度衰减为 $a_{ij}(\tau_k)$, 时延为 τ_k , 噪声为 $n_i(t)$ 。如图 3 所示, 对于式(8)所示的混合信号, 直观的方法是通过有限冲激响应(FIR, finite impulse response)滤波器

的方式进行信号分离, 如式(9)所示^[4]

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K w_{ij}(\tau_k) x_j(t - \tau_k) + n'_i(t) \quad (9)$$

由于时域卷积对应频域相乘, 可将卷积混合信号转换至频域进行分离^[4,15-17]。对式(8)进行短时傅里叶变换, 可以得到^[16]

$$X(\omega, \nu) = A(\omega)S(\omega, \nu) + N(\omega) \quad (10)$$

其中, ν 为短时傅里叶变换的帧号。转换至频域后, 信号的混合模型重新变成线性瞬时混合形式, 已有的复数盲源分离算法均可以实现频域分离。

由于盲源分离固有的次序和幅度模糊问题会给信号拼接带来困难, 频域分离信号需要进行次序和幅度修正, 最后通过傅里叶逆变换恢复时域信号。由于每段数据的长度与多径数目存在一定关系, 分段长度在实际中要合理选取^[16-17]。分离矩阵含有的波束信息以及相临分段间信号的相关性, 均可用于对分离信号的次序和幅度进行修正^[17]。

自 20 世纪 90 年代被提出以来, 特征矩阵联合近似对角化(JADE)算法以其出色的分离精度和处理速度^[49], 已经成为经典的盲源分离算法之一, 一些研究工作直接采用 JADE 算法^[61]或将其作为对比算法^[62]。因此, 本文利用 JADE 算法进行时域分离, 同频域分离方法进行性能比较。一组卷积混合信号的分离结果如图 4 所示。

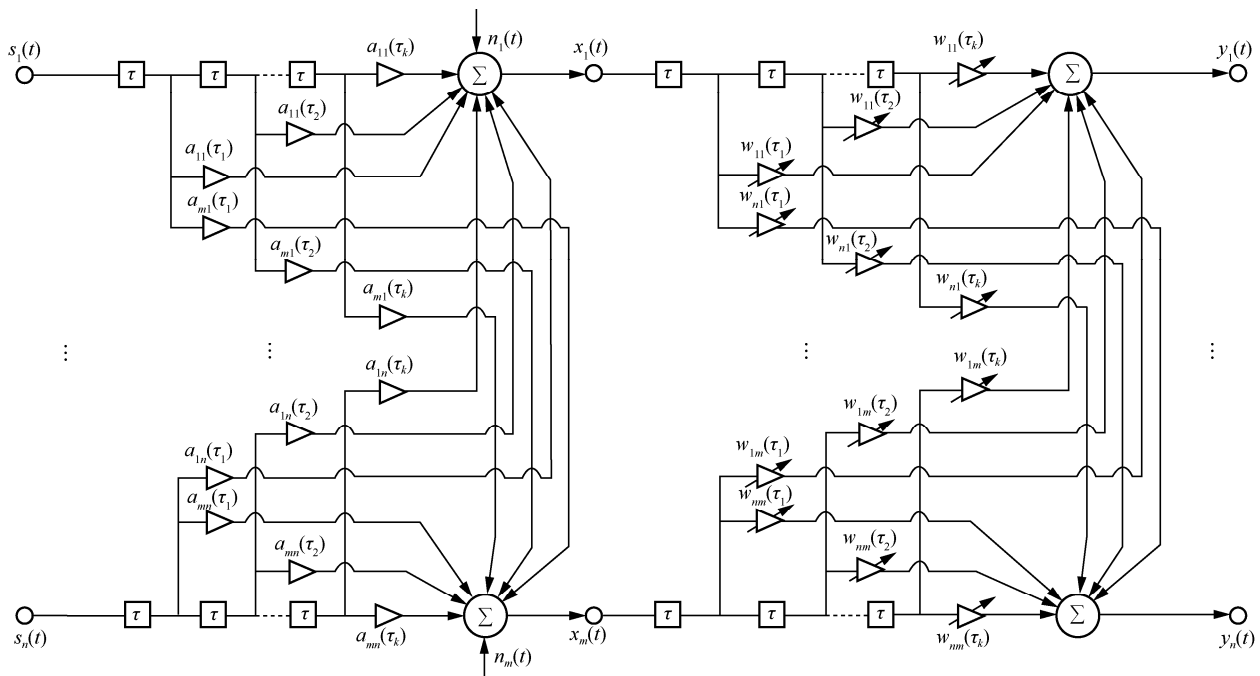


图 3 卷积混合信号盲源分离过程

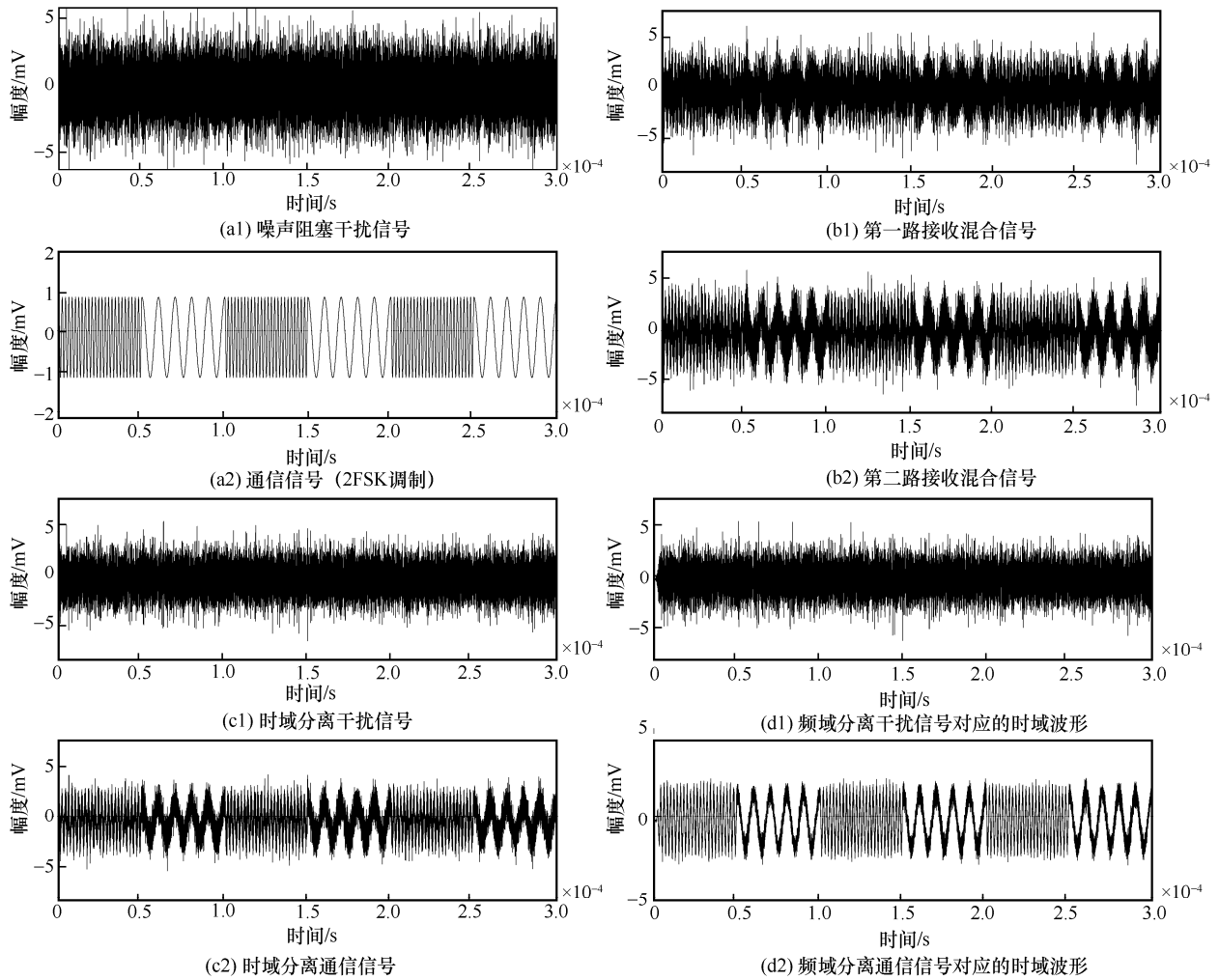


图 4 一组卷积混合信号的分离结果

图 4(a)展示了噪声阻塞干扰信号和通信信号(2FSK 调制)波形;混合信号波形如图 4(b)所示,仿真中设定每路信号含有 3 条路径。图 4(c)为采用 JADE 算法的时域分离信号波形,图 4(d)为频域分离信号波形。从图 4(c)和图 4(d)可以定性看出,频域盲源分离方法对卷积混合信号的分离性能优于时域分离方法。

相关系数是衡量信号相似程度的重要指标,信号 X 和信号 Y 的相关系数定义式为^[63]

$$\rho_{XY} = \frac{E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}}{\sqrt{E\{[X - E(X)]^2\}}\sqrt{E\{[Y - E(Y)]^2\}}} \quad (11)$$

其中,相关系数 ρ_{XY} 取值为 0~1,当 $\rho_{XY}=0$ 时,2 个信号不相关;当 $\rho_{XY}=1$ 时,2 个信号相关性最强。盲源分离抗干扰技术追求的主要目标是从含干扰的混合信号中分离出的通信信号与原通信信号完

全相关,即相关系数为 1。图 4 所示的结果中, JADE 算法的时域分离通信信号与原通信信号的相关系数为 0.813 1,频域盲源分离信号对应的相关系数为 0.962 7,性能提升约 18.40%。

2.1.3 欠定盲源分离

传统超定和适定盲源分离可以通过矩阵求逆的方法估计混合矩阵,进而实现信号分离^[7]。但是,无线通信经常遇到接收天线数目少于源信号数目的欠定情况。此时,盲源分离需要通过较少混合信号分离出较多源信号,由于混合矩阵为病态,求解过程较超定和适定情况更加复杂。针对欠定盲源分离的特殊性,通常采取“两步走”的方法:先估计分离矩阵,再恢复源信号^[18]。

学术界将基于稀疏性的信号处理的方法称为稀疏分量分析(SCA, sparse component analysis)^[19]。SCA 已经成为欠定盲源分离的重要解决途径^[19-22]。稀疏是指矩阵或向量中多数元素取值为零,仅有极少

数元素取值为非零^[20]。一般来说, 时域信号非稀疏, 经过短时傅里叶变换或小波包变换后, 变换域信号通常具有较好的稀疏性^[20-21]。利用信号稀疏性进行欠定盲源分离的原理比较直观, 即使源信号数目较多, 但只要每个时刻“活跃”(取值为非零)的源信号数目少于或等于接收天线数目, 即可实现信号分离。

为便于分析, 假设源信号足够稀疏, 多数时刻仅有一个非零元素。对于非零元素多于一个的情况, 该方法仍然成立。对于第一个源信号取值为非零的 L 个源信号列向量 $\mathbf{u}(i_1), \mathbf{u}(i_2), \dots, \mathbf{u}(i_L)$, $\mathbf{u}(i_l) = [s(i_l), \dots, J(i_l)]^T$, 有^[20]

$$[\mathbf{x}(i_1), \mathbf{x}(i_2), \dots, \mathbf{x}(i_L)] = \mathbf{A}[\mathbf{u}(i_1), \mathbf{u}(i_2), \dots, \mathbf{u}(i_L)] \quad (12)$$

在 $1 \sim n$ 中选取一个数值 q , 利用式(12)可以构建如下矩阵^[21]

$$\begin{bmatrix} x_1(i_1) & \dots & x_1(i_L) \\ x_q(i_1) & \dots & x_q(i_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(i_1) & \dots & x_n(i_L) \\ x_q(i_1) & \dots & x_q(i_L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{11} \\ a_{q1} & \dots & a_{q1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{n1} \\ a_{q1} & \dots & a_{q1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)右侧每一列均对应着混合矩阵 \mathbf{A} 的第一列 \mathbf{a}_1 , 经过平均以后即可得到 \mathbf{a}_1 的近似估计。因此, 在 K 个时刻按照式(13)构建矩阵, 由于存在 n 个源信号, K 列将主要有 n 种取值, 对应着混合矩阵的 n 个列向量。已知数据的分类数目 n , 较多算法可以将信号聚类并估计其中心位置 $d_i (1 \leq i \leq n)$ 。由式(13)可知, 每个聚类的中心对应着混合矩阵的一个列向量^[18], 从而可以实现混合矩阵估计^[20-21]。当源信号稀疏性稍弱时, 聚类性能会受到影响, 通过信号角度变化剔除发散点可以提高聚类性能^[64], 也可以通过密度聚类方法提高聚类中心的估计精度^[22]。

估计出混合矩阵以后, 考虑信号的稀疏性, 源信号可在最小化源信号范数情况下恢复, 如式(14)所示^[19-21]。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \|u_i(j)\| \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{n} = \mathbf{x} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)是典型的线性规划问题, 求解方法比较成熟, 本文不再赘述。

文献[50]利用通用软件无线电设备 (USRP, universal software radio peripheral) 构建了原型系统, 对天线发射和接收信号进行了多通道盲源分离

实验, 在干扰信号带宽覆盖通信信号带宽且干扰信号功率大于通信信号功率的情况下, 采用盲源分离技术较未采用盲源分离技术的抗干扰能力提升 20 dB 以上。在实际工程中, 盲源分离抗干扰性能的提升还将受到诸多非理想因素的限制。

2.2 单通道盲源分离抗干扰技术

由于大量通信设备仅设置单根天线, 多通道盲源分离抗干扰技术难以直接适用, 单通道盲源分离抗干扰技术的需求十分迫切, 但技术难度显著增大。

2.2.1 单通道盲源分离基本思路

加性信道情况下, 单通道接收混合信号可写成

$$x(t) = as(t) + bJ(t) + n(t) \quad (15)$$

其中, $s(t)$ 为通信信号, $J(t)$ 为干扰信号, $n(t)$ 为噪声, a 和 b 分别为通信信号和干扰信号的衰减系数。为便于分析, 此处未考虑多径的情况。式(15)表明, 单通道盲源分离本质上是极端欠定方程的求解问题, 旨在利用有限已知量 $x(t)$ 求解较多未知量 ($s(t), J(t)$), 难度极大。由于问题本身的复杂性, 单通道盲源分离目前还尚未形成统一的理论框架, 学术界主要针对特定场景提出了一些针对性解决方案。对于通信抗干扰场景, 本文主要关注利用信号变换域差异的单通道盲源分离技术。

单天线接收的多个信号在时域和频域都相互混叠, 但只要各信号在变换域互不重合即可进行分离^[65]。因此, 可利用信号在变换域的差异构建出多个虚拟观测信号, 使混合情况变为适应甚至超定, 为信号分离创造条件, 主要思路如图 5 所示。

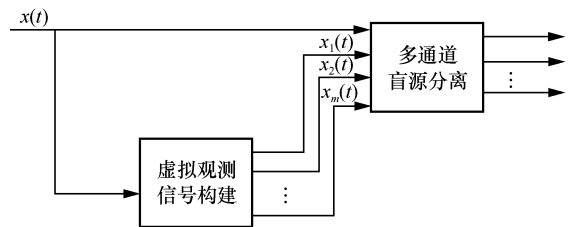


图 5 单通道盲源分离基本思路

图 5 中, 通过单路混合信号构建出多个虚拟观测信号, 进而可利用多通道盲源分离技术实现信号分离^[27,66]。

目前, 循环平稳^[67-69]和经验模式分解 (EMD, empirical-mode decomposition)^[70-71]等信号处理方法为虚拟观测信号构建提供了理论基础。

2.2.2 基于循环平稳的虚拟观测信号构建

如果随机过程 $x(t)$ 的自相关函数具有周期

性, 则 $x(t)$ 为循环平稳随机过程^[67]。即

$$R_x(t, \tau) = E \left[x \left(t + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] = R_x(t + kT, \tau) \quad (16)$$

其中, *表示共轭, $E[\cdot]$ 表示数学期望。对 $R_x(t, \tau)$ 进行傅里叶级数展开, 可以得到^[67]

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha=1}^{\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (17)$$

其中, 傅里叶系数可表示为

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (18)$$

其中, $R_x^{\alpha}(\tau)$ 为循环自相关函数, α 为循环频率^[68]。对 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 进行傅里叶变换, 得到

$$S_x^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (19)$$

其中, $S_x^{\alpha}(f)$ 称为循环谱, 也称为谱相关函数^[68]。根据循环平稳理论, 循环谱具有如下性质^[69]。

① 统计独立信号之和的循环谱为各信号循环谱之和。

② 仅当循环频率 $\alpha = 0$ 时, 高斯白噪声的循环谱非零。

③ 循环谱由载频、符号速率和调制方式等参数决定。

根据性质①, 混合信号的循环谱 $S_x^{\alpha}(f)$ 为通信信号循环谱 $S_s^{\alpha}(f)$ 、干扰信号循环谱 $S_j^{\alpha}(f)$ 和噪声的循环谱 $S_n^{\alpha}(f)$ 之和。根据性质②, 在非零循环频率处进行处理, 可去除高斯白噪声影响。根据性质③, 接收端可以根据通信参数构建通信信号的近似循环谱 $\hat{S}_s^{\alpha}(f)$ 。对于式(15)所示的混合信号, 如果源信号时频域互不重叠, 可通过滤波的方法实现信号分离。但是, 在通信抗干扰场景中, 干扰信号与通信信号时频域高度重叠, 常规的滤波方法难以适用。根据循环谱的性质③, 由于干扰信号和通信信号的载频、符号速率和调制方式不可能完全一致, 因此 $S_s^{\alpha}(f)$ 和 $S_j^{\alpha}(f)$ 必将有所差异。Gardner 等^[67]提出了线性共轭线性-频移 (LCL-FRESH) 滤波器, 可以实现信号的循环平稳滤波。对于复信号 $x(t)$, 设 LCL-FRESH 滤波器的输出结果为通信信号 $s(t)$ 的估计 $\hat{s}(t)$, 即

$$\hat{s}(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \otimes x_{\alpha_m}(t) + \sum_{n=1}^N b_n(t) \otimes x_{-\beta_n}^*(t) \quad (20)$$

其中, $a_m(t)$ 和 $b_n(t)$ 为滤波器的脉冲响应函数, $x_{\alpha_m}(t) = x(t) \exp(i2\pi\alpha_m t)$, $x_{-\beta_n}^*(t) = x^*(t) \exp(i2\pi\beta_n t)$, $\{\alpha_m\}$ 和 $\{\beta_n\}$ 为频率集^[68]。式(20)等价于多变量维纳滤波器^[69]

$$\begin{cases} \mathbf{h}(t) = [a_1(t), \dots, a_M(t), b_1(t), \dots, b_N(t)]^T \\ \mathbf{z}(t) = [x_{\alpha_1}(t), \dots, x_{\alpha_M}(t), x_{-\beta_1}^*(t), \dots, x_{-\beta_N}^*(t)]^T \end{cases} \quad (21)$$

因此, 式(21)可以写成^[69]

$$\hat{s}(t) = \mathbf{h}^T(t) \otimes \mathbf{z}(t) \quad (22)$$

其中, \otimes 表示卷积运算。通过求解式(22)所示的线性方程, 使 $\hat{s}(t)$ 和 $s(t)$ 的误差最小, 即可求得 LCL-FRESH 滤波器所有参数^[69]。

实际计算中, 参数空间不可能无穷大, 因而 $\hat{s}(t)$ 中仍将含有干扰信号成分。可在 $\hat{s}(t)$ 基础上通过施密特正交对消方法获得干扰信号的近似估计 $\hat{J}(t)$ ^[48]。由此, 利用混合信号可构建出 2 个虚拟观测信号, 使混合情况变成超定, 再利用多通道盲源分离进一步实现信号分离^[66]。

2.2.3 基于 EMD 的虚拟观测信号构建

经验模态分解 (EMD) 是处理非线性非平稳信号的有效手段, 无须预先指定基函数即可自适应地将信号拆分成若干个本征模函数 (IMF, intrinsic-mode functions)。由于各 IMF 包含原信号不同时间尺度的局部特征信息, EMD 能够获得信号的时-频-能量细节表征^[70]。

对混合信号 $x(t)$, 令第一个分量 $h_0 = x(t)$, EMD 首先构建其上包络和下包络, 得到平均包络信号 m_1 , 从 $x(t)$ 去除 m_1 得到第一个分量 h_1 ^[71]

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (23)$$

将 h_1 作为信号, 重复上述去除平均包络的过程。定义标准偏差 Γ 为

$$\Gamma = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_i(t) - h_{i-1}(t)|^2}{h_{i-1}^2(t)} \right], i=1, 2, \dots \quad (24)$$

当 Γ 小于给定的阈值时, 即得到第一个 IMF, 记为 c_1 ^[71]。

得到 c_1 以后, 用信号 $x(t)$ 减去 c_1 , 继续上述步骤, 当最后的 IMF 足够单调时迭代结束。因此, 原信号即全部 IMF 和残差 r_n 之和, 即^[71]

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k + r_n \quad (25)$$

由此,原信号 $x(t)$ 可分解为 K 个 IMF 和一路残差,各 IMF 中含有不同程度的 $s(t)$ 和 $J(t)$,实现了多个虚拟观测信号构建。

上述方法为单通道盲源分离创造了条件,但是,为达到通信抗干扰要求,该类方法的分离精度和计算复杂度还需进一步优化。与多通道盲源分离技术相比,单通道盲源分离理论还未成熟,当前所能达到的技术性能与多通道盲源分离相比还存在差距,需要予以更多的关注。

3 盲源分离通信抗干扰技术的主要特点

3.1 抗宽频段压制干扰

盲源分离利用通信信号和干扰信号的统计域特征差异进行信号分离,在传统空域、频域、码域、时域等抗干扰技术架构基础上,增加了统计域维度。对于宽频段压制干扰甚至全工作频段压制干扰,传统抗干扰技术将面临无频可用且难以硬抗的被动局面。但是,在接收端未饱和溢出情况下,盲源分离依然可实现通信信号和全压制干扰信号分离,从而为对抗极端恶劣干扰提供一种有效手段。

3.2 缓解频谱资源与抗干扰能力之间的固有矛盾

扩谱技术(跳频、直接序列扩谱等)是当前国内外通信抗干扰的主流技术手段,其抗干扰能力以频谱资源为代价^[1]。随着用频装备和用频需求不断增加,频谱资源日益紧张。香农公式表明^[72],抗干扰能力不能随着带宽增加而无限增加,频谱资源的有限性还限制了扩谱抗干扰能力的进一步提升。盲源分离抗干扰技术具有“容扰”的特点,可实现通信信号与干扰信号共存。盲源分离抗干扰技术能够在不增加频谱资源的条件下明显提高通信抗干扰能力,为缓解频谱资源与抗干扰能力之间的固有矛盾提供了一种有效的解决方案。

3.3 节省勤务信令开销

智能抗干扰技术通过智能认知、智能决策、波形机动和频谱机动等步骤,根据电磁环境变化自动调整通信参数来提高抗干扰能力^[3]。一般来说,通信双方采取相同的通信参数才能正常通信,因此,智能抗干扰需要交互勤务信令以确保收发端同步调整。点对点通信中,上述信令交互问题尚不明显。但是,在大规模自组织网络情况下,多节点间交互干扰认知结果和协调抗干扰策略将造成大量信令开销。干扰严重时需要更多的信令交互,然而受扰信道又难以提供更多的时频资源。盲源分离在接收

端的信号层面进行盲处理,几乎不需要与发送端交互信令,可节省勤务信令所需的系统开销。

3.4 具有内生抗干扰属性

盲源分离性能主要受源信号的相关性影响,几乎不受载频、带宽、调制方式等因素影响。因此,盲源分离对宽频段阻塞、梳状阻塞、扫频等常见干扰具有较好的适应性,不依赖电磁环境感知结果进行调整。盲源分离抗干扰技术在信号空间增加了统计域维度,符合“ $N+1$ ”维的内生抗干扰框架^[3]。

4 下一步发展重点

4.1 解决模型理想化问题

传统盲源分离在源信号统计独立情况下发展起来,目标函数多数以独立性或非相关性为准则。但是,实际应用中,无线通信还可能面临跳频跟踪干扰和直扩相关干扰,其波形与通信信号具有很强的相关性^[1],源信号统计独立的假设前提不再成立,即已有的盲源分离方法难以抗相关干扰。

另外,盲源分离的混合模型过于理想,主要以线性瞬时混合模型和卷积混合模型为主,未考虑电波的大尺度和小尺度模型,尤其是城市、郊区、丘陵等地形地貌对信号的影响。

深度神经网络能够从原始数据中提取复杂特征,还可实现复杂的非线性系统建模,已经成为信号处理的有力工具^[28-29,73]。深度神经网络能够深入挖掘信号和信道的细节特征,可为相关信号和复杂信道混合信号分离^[74]提供解决方法。

神经网络的深度和训练数据的广度还可弥补单通道盲源分离维度的不足,近年来,基于深度神经网络的语音信号单通道盲源分离研究取得了较大进展^[30-31],可进一步提高无线信号单通道盲源分离技术性能^[75]。

4.2 降低处理时延

传统超定和适定盲源分离利用多通道数据估计高阶积累量或非线性函数,涉及大量矩阵和高阶运算,计算复杂度较高。欠定盲源分离通常对信号进行短时傅里叶变换和逆变换以及聚类运算,计算复杂度进一步增加^[18-22]。基于粒子滤波的单通道盲源分离技术需要对未知变量的后验概率分布进行蒙特卡罗采样,在粒子多样性匮乏时还需要重采样,计算复杂度太大^[25]。基于深度神经网络的单通道盲源分离在训练阶段需要大量的卷积和梯度运算,计算复杂度随网络规模增大而大幅提高^[30-31]。

随着复杂度不断增加, 盲源分离算法的处理时延也相应增加, 满足高速无线通信实时性要求的压力越来越大。

光器件具有超大带宽、低功耗和极低时延等优点^[57], 可为实时盲源分离提供新的技术支持。近年来, 光器件信号处理获得巨大突破, 实现了光子神经网络深度学习的原位反向传播^[76], 开发出基于卷积神经网络的硅基集成光子处理器^[77], 验证了光学卷积处理器对手写数字的分类能力^[78], 实现了 50 GBaud/s 的光信号盲源分离^[57], 提高了病态混合情况下的分离信号信干比^[79]。

上述工作为光器件盲源分离创造了有利条件, 为盲源分离在超大带宽和超高速率无线通信场景下的抗干扰应用奠定了基础。但是, 光模拟运算及光神经网络还面临着低精度和噪声累积条件下的高准确率计算等问题^[80]。

4.3 提高信号分离精度

分离精度直接影响抗干扰效果, 盲源分离抗干扰对分离精度的追求没有止境。在强干扰情况下, 通信信号功率远小于干扰信号, 分离矩阵的微小偏差可能会使通信信号出现较大损失, 残留干扰仍将对通信性能造成不利影响。如干信比为 20 dB 时, 即使 99% 的干扰成分得到了分离, 1% 残留干扰的功率仍然与通信信号相当。因此, 在强干扰条件下, 特别需要关注信号高精度分离问题。

无线通信收发双方共享跳频图案、调制方式、信息速率、载频等先验信息。通信过程中, 导频、同步等信号还可实时提供额外的先验信息。在信号处理领域, 随着先验信息的增加, 估计和求解的精度将随之提升。如果能够利用先验信息设计高精度半盲分离算法, 以进一步提高抗强干扰的能力, 对无线通信抗干扰具有非常重要的意义。但是, 传统盲源分离从“盲”的角度建立起来, 如何打破全盲的理论框架, 使先验信息的利用成为可能, 是需要重点研究的问题。

5 结束语

盲源分离抗干扰技术具有不增加频谱资源和节省勤务信令开销等独特优点, 实践表明, 在已有抗干扰手段基础上, 可进一步提升抗干扰能力。盲源分离抗干扰技术体系已经建立并取得一些实用化成果, 但在模型构建和实时性、精确性等方面还面临一些新的挑战。后续研究需要关注基于深度学

习的单通道盲源分离、光器件盲源分离和半盲源分离等技术, 为盲源分离抗干扰提供新的能力增量。同时, 还需要推进盲源分离抗干扰技术与智能抗干扰技术联合设计, 以进一步提高无线通信的系统抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践: 第 2 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
YAO F Q. Communication anti-jamming engineering and practice[M]. 2nd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [2] 于全. 战术通信[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
YU Q. Communications in tactical environments[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021.
- [3] YAO F Q, ZHU Y G, SUN Y F, et al. Wireless communications “N+1 dimensionality” endogenous anti-jamming: theory and techniques[J]. Security and Safety, 2023, 2: 2023003.
- [4] HYVÄRINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [5] HYVÄRINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4/5): 411-430.
- [6] HÉRAULT J, JUTTEN C. Space or time adaptive signal processing by neural network models[C]//Proceedings of AIP Conference. [S.l.:s.n.], 1986: 206-211.
- [7] COMON P, JUTTEN C. Handbook of blind source separation: independent component analysis and applications[M]. London: Academic Press, Inc., 2010.
- [8] COMON P. Independent component analysis, a new concept?[J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.
- [9] CARDOSO J F. Source separation using higher order moments[C]//Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2002: 2109-2112.
- [10] BELOUCHRANI A, ABED-MERAIM K, CARDOSO J F, et al. A blind source separation technique using second-order statistics[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(2): 434-444.
- [11] GEORGIEV P, CICHOCKI A. Robust blind source separation utilizing second and fourth order statistics[C]//Artificial Neural Network. Berlin: Springer, 2002: 1162-1167.
- [12] JEAN-FRAN B. Maximum likelihood source separation for discrete sources[Adel[C]// EUSIPCO'94. [S.l.:s.n.], 1994: 768-771.
- [13] YANG H H, AMARI S I. Adaptive online learning algorithms for blind separation: maximum entropy and minimum mutual information[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1457-1482.
- [14] CARDOSO J F. Infomax and maximum likelihood for blind source separation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(4): 112-114.
- [15] PARRA L, SPENCE C. Convolutional blind separation of non-stationary sources[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2000, 8(3): 320-327.

- [16] ARAKI S, MUKAI R, MAKINO S, et al. The fundamental limitation of frequency domain blind source separation for convolutive mixtures of speech[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2003, 11(2): 109-116.
- [17] SAWADA H, MUKAI R, ARAKI S, et al. A robust and precise method for solving the permutation problem of frequency-domain blind source separation[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2004, 12(5): 530-538.
- [18] BOFILL P, ZIBULEVSKY M. Underdetermined blind source separation using sparse representations[J]. *Signal Processing*, 2001, 81(11): 2353-2362.
- [19] GEORGIEV P, THEIS F, CICHOCKI A. Sparse component analysis and blind source separation of underdetermined mixtures[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(4): 992-996.
- [20] LI Y Q, CICHOCKI A, AMARI S I. Analysis of sparse representation and blind source separation[J]. *Neural Computation*, 2004, 16(6): 1193-1234.
- [21] LI Y Q, AMARI S, CICHOCKI A, et al. Underdetermined blind source separation based on sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(2): 423-437.
- [22] LI C J, ZHU L D, LUO Z Q. Underdetermined blind source separation of adjacent satellite interference based on sparseness[J]. *China Communications*, 2017, 14(4): 140-149.
- [23] 解元, 邹涛, 孙为军, 等. 面向高混响环境的欠定卷积盲源分离算法[J]. *通信学报*, 2023, 44(2): 82-93.
- XIE Y, ZOU T, SUN W J, et al. Algorithm of underdetermined convolutive blind source separation for high reverberation environment[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(2): 82-93.
- [24] JANG G J, LEE T W. A maximum likelihood approach to single-channel source separation[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2003, 4: 1365-1392.
- [25] 万坚, 涂世龙, 廖灿辉, 等. 通信混合信号盲分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- WAN J, TU S L, LIAO C H, et al. Theory and technology on blind separation of communication signals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [26] MIJOVIĆ B, DE VOS M, GLIGORIJEVIĆ I, et al. Source separation from single-channel recordings by combining empirical-mode decomposition and independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 57(9): 2188-2196.
- [27] GAO B, WOO W L, DLAY S S. Single-channel source separation using EMD-subband variable regularized sparse features[J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2011, 19(4): 961-976.
- [28] HINTON G, DENG L, YU D, et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: the shared views of four research groups[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, 29(6): 82-97.
- [29] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [30] LUO Y, MESGARANI N. TaSNet: time-domain audio separation network for real-time, single-channel speech separation[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 696-700.
- [31] LUO Y, MESGARANI N. Conv-TasNet: surpassing ideal time-frequency magnitude masking for speech separation[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, 27(8): 1256-1266.
- [32] WANG D L, CHEN J T. Supervised speech separation based on deep learning: an overview[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2018, 26(10): 1702-1726.
- [33] CHEN X, XU X Y, LIU A P, et al. Removal of muscle artifacts from the EEG: a review and recommendations[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5353-5368.
- [34] YE C, TOYODA K, OHTSUKI T. Blind source separation on non-contact heartbeat detection by non-negative matrix factorization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2020, 67(2): 482-494.
- [35] GURVE D, KRISHNAN S. Separation of fetal-ECG from single-channel abdominal ECG using activation scaled non-negative matrix factorization[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(3): 669-680.
- [36] KARAMATLI E, KIRBiZ S. MixCycle: unsupervised speech separation via cyclic mixture permutation invariant training[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, 29: 2637-2641.
- [37] PEZZOLI M, CARABIAS-ORTI J J, COBOS M, et al. Ray-space-based multichannel nonnegative matrix factorization for audio source separation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 369-373.
- [38] CHIEN J T. Source separation and machine learning[M]. London: Academic Press, 2019.
- [39] NERI J, BADEAU R, DEPALLE P. Unsupervised blind source separation with variational auto-encoders[C]//*Proceedings of 2021 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 311-315.
- [40] 彭聪, 刘彬, 周乾. 基于机器视觉和盲源分离的机械故障检测[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(9): 953-960.
- PENG C, LIU B, ZHOU Q. Mechanical fault detection based on machine vision and blind source separation[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(9): 953-960.
- [41] RAHMATI M, POMPILI D. UNISec: inspection, separation, and classification of underwater acoustic noise point sources[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(3): 777-791.
- [42] 王景景, 李爽, 李嘉恒, 等. 一种基于盲源分离的水声信号高斯/非高斯噪声抑制方法: CN112133321B[P]. 2021-05-14.
- WANG J J, LI S, LI J H, et al. Underwater acoustic signal Gaussian/non-Gaussian noise suppression method based on blind source separation: CN112133321B[P]. 2021-05-14.
- [43] 李红光, 郭英, 张东伟, 等. 基于欠定盲源分离的同步跳频信号同台分选[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(2): 319-328.

- LI H G, GUO Y, ZHANG D W, et al. Synchronous frequency hopping signal network station sorting based on underdetermined blind source separation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(2): 319-328.
- [44] TESTI E, GIORGETTI A. RSS-based localization of multiple radio transmitters via blind source separation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(3): 532-536.
- [45] LIU X B, GUAN Y L. Single-channel blind separation of unsynchronized multiuser PSK signals with non-identical sampling frequency offsets[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(11): 2774-2778.
- [46] XU Z H, YUAN M. An interference mitigation technique for automotive millimeter wave radars in the tunable Q-factor wavelet transform domain[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(12): 5270-5283.
- [47] JIN B Z, SUN J, YE P P, et al. Data-driven sparsity-based source separation of the aliasing signal for joint communication and radar systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(2): 2161-2174.
- [48] 黄知涛, 王翔, 彭耿. 欠定盲源分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- HUANG Z T, WANG X, PENG G. Theory and technology on underdetermined blind source separation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.
- [49] 于淼, 王曰海, 汪国富. 基于 BSS 的跳频通信抗部分频带噪声阻塞干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(5): 1079-1084.
- YU M, WANG Y H, WANG G F. BSS based anti-jamming method for frequency hopping communication against partial-band noise jamming[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(5): 1079-1084.
- [50] YU M. The blind separation of wireless communication signals utilizing USRP[C]//*Proceedings of 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 677-680.
- [51] YU M, LI C, ZENG X W, et al. A wireless communication receiving method based on blind source separation with adaptive mode switching[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 731-735.
- [52] YU M, YU L, LI C, et al. A time-frequency information based method for BSS output FH signal recognition[C]//*Proceedings of 2021 13th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 343-347.
- [53] GU M M, GUO P C, YU M. Improving separation performance of wireless communication signals with antenna angle adjustment[C]//*Proceedings of IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 689-693.
- [54] FOUDA M E, SHEN C G, ELTAWIL A E. Blind source separation for full-duplex systems: potential and challenges[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 1379-1389.
- [55] CHEN S, LIN Y, YUAN Y, et al. Airborne SAR suppression of blanket jamming based on second order blind identification and fractional order Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-14.
- [56] LEI Z S, QU Q Z, CHEN H, et al. Mainlobe jamming suppression with space-time multichannel via blind source separation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(15): 17042-17053.
- [57] HUANG C R, WANG D L, ZHANG W P, et al. High-capacity space-division multiplexing communications with silicon photonic blind source separation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1617-1632.
- [58] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [59] 齐扬阳, 于淼, 关志强. 基于小波降噪和盲源分离的跳频通信抗干扰方法研究[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(1): 72-78.
- QI Y Y, YU M, GUAN Z Q. Anti-jamming method for frequency hopping communication based on BSS and wavelet denoising[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2015, 35(1): 72-78.
- [60] 余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- YU X C, HU D. Theory and application of blind source separation[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [61] LI S, GUO J. An angle error extraction algorithm based on JADE for three-channel radar seeker system with the existence of deception jamming[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 131: 103754.
- [62] MIKA D. Fast gradient algorithm for complex ICA and its application to the MIMO systems[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 11633.
- [63] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计: 第 3 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. Probability theory and mathematical statistics[M]. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [64] REJU V G, KOH S N, SOON Y. An algorithm for mixing matrix estimation in instantaneous blind source separation[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(9): 1762-1773.
- [65] HOPGOOD J R, RAYNER P J W. Blind single channel deconvolution using nonstationary signal processing[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2003, 11(5): 476-488.
- [66] CAI X, WANG X, HUANG Z T, et al. Single-channel blind source separation of communication signals using pseudo-MIMO observations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(8): 1616-1619.
- [67] GARDNER W A, NAPOLITANO A, PAURA L. Cyclostationarity: Half a century of research[J]. *Signal Processing*, 2006, 86(4): 639-697.
- [68] GARDNER W A, SPOONER C M. The cumulant theory of cyclostationary time-series. I. Foundation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(12): 3387-3408.
- [69] GARDNER W A. Cyclic Wiener filtering: theory and method[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, 41(1): 151-163.
- [70] ZEILER A, FALTERMEIER R, KECK I R, et al. Empirical mode decomposition - an introduction[C]//*Proceedings of 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Piscataway: IEEE

Press, 2010: 1-8.

- [71] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [72] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [73] BENGIO Y, LECUN Y, HINTON G. Deep learning for AI[J]. Communications of the ACM, 2021, 64(7): 58-65.
- [74] ZAMANI H, RAZAVIKIA S, OTROSHI-SHAHREZA H, et al. Separation of nonlinearly mixed sources using end-to-end deep neural networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020, 27: 101-105.
- [75] LUO W L, YANG R J, JIN H B, et al. Single channel blind source separation of complex signals based on spatial-temporal fusion deep learning[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2023, 17(2): 200-211.
- [76] PAI S, SUN Z H, HUGHES T W, et al. Experimentally realized in situ backpropagation for deep learning in photonic neural networks[J]. Science, 2023, 380(6643): 398-404.
- [77] BAI B W, YANG Q P, SHU H W, et al. Microcomb-based integrated photonic processing unit[J]. Nature Communications, 2023, 14: 66.
- [78] MENG X Y, ZHANG G J, SHI N N, et al. Compact optical convolution processing unit based on multimode interference[J]. Nature Communications, 2023, 14: 3000.
- [79] ZHANG W P, TAIT A, HUANG C R, et al. Broadband physical layer cognitive radio with an integrated photonic processor for blind source separation[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1107.
- [80] 陈蓓, 张肇阳, 戴庭舸, 等. 光学神经网络及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023: doi.org/3788/LOP222304.
- CHEN B, ZHANG Z Y, DAI T G, et al. Photonic neural networks and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023: doi.org/3788/LOP222304.

[作者简介]



姚富强 (1957-), 男, 安徽枞阳人, 博士, 中国工程院院士, 国防科技大学第六十三研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为通信抗干扰。



于淼 (1975-), 男, 吉林永吉人, 博士, 国防科技大学第六十三研究所高级工程师, 主要研究方向为通信抗干扰。



郭鹏程 (1991-), 男, 河南济源人, 国防科技大学第六十三研究所博士生, 主要研究方向为通信抗干扰。



顾淼淼 (1995-), 女, 江苏南京人, 中国人民解放军 31609 部队助理工程师, 主要研究方向为通信抗干扰。