

# 盲信号分离与传感器技术融合方法及应用研究

林兴俊, 苏增烨, 刘佳慧, 聂宇丹, 于海澜\*

广州商学院信息技术与工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年5月5日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月26日

## 摘要

本研究旨在探索盲信号分离(BSS)与传感器技术的协同优化机制及其在复杂环境中的应用价值。通过系统梳理BSS核心算法(如ICA、PCA)的数学原理及传感器技术的设计原则(微型化、低功耗、高灵敏度), 提出数据预处理与BSS联合优化策略, 以解决多源信号干扰与噪声抑制难题。结合农业传感器网络、MEMS器件动态监测及远程医疗等场景案例, 验证了融合技术在农田环境监测、牲畜行为分析及呼吸信号分离中的有效性。结果表明, BSS可显著提升复杂环境下数据采集的准确性与鲁棒性, 而传感器技术的微型化与智能化为边缘计算提供了硬件支持。结论指出, 两者的结合不仅推动了精准农业与智能医疗的发展, 还为基础设施薄弱地区的实时监测提供了技术路径, 未来需进一步优化算法轻量化与低成本传感器研发。

## 关键词

盲信号分离, 传感器技术, 复杂环境, 数据预处理, 应用实践

# Research on the Fusion Method and Application of Blind Signal Separation and Sensor Technology

Xingjun Lin, Zengye Su, Jiahui Liu, Yudan Nie, Hailan Yu\*

School of Information Technology & Engineering, Guangzhou College of Commerce, Guangzhou Guangdong

Received: May 5<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This research aims to explore the collaborative optimization mechanism of Blind Signal Separation (BSS) and sensor technology, as well as its application value in complex environments. By

\*通讯作者。

文章引用: 林兴俊, 苏增烨, 刘佳慧, 聂宇丹, 于海澜. 盲信号分离与传感器技术融合方法及应用研究[J]. 光电子, 2025, 15(2): 35-45. DOI: 10.12677/oe.2025.152004

systematically reviewing the mathematical principles of core algorithms in BSS (such as ICA and PCA) and the design principles of sensor technology (miniaturization, low power consumption, and high sensitivity), a joint optimization strategy for data preprocessing and BSS is proposed to address the problems of multi-source signal interference and noise suppression. Combined with case studies in agricultural sensor networks, dynamic monitoring of MEMS devices, and remote medical care, the effectiveness of the integrated technology in monitoring agricultural environments, analyzing livestock behavior, and separating respiratory signals has been verified. The results show that BSS can significantly improve the accuracy and robustness of data acquisition in complex environments, while the miniaturization and intelligence of sensor technology provide hardware support for edge computing. The conclusion indicates that the combination of the two technologies not only promotes the development of precision agriculture and intelligent healthcare, but also provides a technical path for real-time monitoring in areas with weak infrastructure. Future research should further optimize the lightweighting of algorithms and the development of low-cost sensors.

## Keywords

Blind Signal Separation, Sensor Technology, Complex Environment, Data Preprocessing, Application Practice

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着数控技术的发展[1]、数字化转型的推进[2]，智能感知正在现代社会中快速发展[3]。它目前被广泛应用于多目标监测[4][5]、健康状态评估[6]-[8]、校园管理[9]-[13]、电子经济[14][15]、地理遥测[16][17]及复杂环境下的数据解析[18][19]等领域。与此同时，传感器技术的快速发展，尤其是基于微机电系统(MEMS)的微型化、低功耗、高精度传感器的普及，使得大规模部署实时监测网络成为可能[20]。然而，在复杂环境中，由于地理条件复杂、基础设施薄弱等因素，传统的信号处理方法难以应对多源信号叠加、噪声干扰严重等问题[21]。因此，如何结合先进的 BSS 算法与高效传感设备，构建适用于复杂场景的数据采集与处理体系，成为当前研究的重要方向。

本研究旨在系统梳理 BSS 与传感器技术的理论进展及其在社会中的应用实践，分析现有技术的优势与局限，并提出未来发展方向。首先介绍 BSS 的核心算法及其数学原理，随后分析传感器技术的设计原则与典型应用场景，接着讨论 BSS 与传感器数据预处理的联合优化策略，最后结合政策支持背景探讨 BSS 技术在中国社会中的实施路径。研究成果不仅有助于推动社会智能化发展，也为边缘计算、远程医疗等领域的技术创新提供理论依据。

## 2. 方法

### 2.1. 盲信号分离(BSS)的基本原理

盲信号分离(Blind Source Separation, BSS)是一种在缺乏源信号先验信息和混合过程未知的情况下，仅通过分析多个传感器采集的观测信号来恢复原始独立源信号的信号处理技术。其核心思想是利用源信号之间的统计独立性或非高斯性等特性，从混合信号中提取出尽可能独立的成分[22]。BSS 广泛应用于温

室大棚[23]、农业智能[24]、手语识别[25]等多个技术领域，并可对热岛效应[26]、水文效应[27]、温室效应[28]等环境问题进行监测分析。

### 2.1.1. 数学模型

BSS 问题通常可以建模为线性混合系统。设  $s(t) \in \mathbb{R}^m$  是由  $m$  个相互统计独立的源信号组成的向量， $x(t) \in \mathbb{R}^n$  是由  $n$  个传感器采集到的观测信号向量，二者之间的关系可表示为：

$$x(t) = As(t) \quad (1)$$

其中， $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$  是一个未知的混合矩阵，描述了源信号如何被传感器接收并混合。当  $n = m$  时，该问题称为“方阵”情况；若  $n > m$  则属于“超定”情形；而  $n < m$  则对应于“欠定”问题。一般情况下，BSS 要求混合矩阵  $A$  满足列满秩条件，即  $\text{rank}(A) = m$ ，从而保证源信号能够被唯一地恢复。

BSS 的目标是寻找一个解混矩阵  $W \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ，使得输出信号  $y(t) = Wx(t)$  尽可能逼近原始源信号  $s(t)$ 。由于混合矩阵  $A$  和源信号  $s(t)$  都是未知的，因此必须依赖观测数据  $x(t)$  的统计特性来估计  $W$ 。

常见的假设包括：

- 1) 源信号之间是相互统计独立的；
- 2) 混合方式是线性的；
- 3) 最多只有一个源信号服从高斯分布；
- 4) 混合矩阵  $A$  是固定的或缓慢变化的[22]。

### 2.1.2. 基本原理

BSS 的核心在于利用信号的统计独立性进行分离。对于任意两个随机变量  $y_1$  和  $y_2$ ，若它们是独立的，则其联合概率密度函数等于边缘概率密度函数的乘积，即：

$$p(y_1, y_2) = p(y_1)p(y_2) \quad (2)$$

因此，BSS 可以通过最小化输出信号之间的互信息来实现，互信息定义如下：

$$I(W) = D_{KL} \left( p(y|W) \parallel \prod_{i=1}^m p(y_i|W) \right) \quad (3)$$

其中， $D_{KL}$  表示 Kullback-Leibler 散度，衡量两个概率分布之间的差异。互信息越小，说明输出信号之间的相关性越低，从而更接近真实源信号。

此外，BSS 还可以基于非高斯性最大化的方法进行求解。根据中心极限定理，多个独立非高斯信号的线性组合趋向于高斯分布，因此最大化输出信号的非高斯性有助于找到最独立的信号成分。常用的方法包括负熵最大化(Negentropy Maximization)和峭度(Kurtosis)优化等[22]。

### 2.1.3. 算法分类与求解方法

BSS 算法主要包括独立成分分析(ICA)、主成分分析(PCA)及其扩展形式(如非线性 PCA)、最大似然估计等。其中，ICA 是最为经典的 BSS 方法之一，它以最大化输出信号的统计独立性为目标，通过固定点迭代(Fast-ICA)、自然梯度下降、EASI (Expectation-Maximization Algorithm for Source Identification)算法等方式求解最优解混矩阵  $W$ 。

目前最广泛使用的 ICA 方法是 Fast-ICA。传统的 Fast-ICA 算法利用了二阶收敛的牛顿迭代方法进行优化，为了加快算法的收敛速度，提高算法的运行效率，何选森等人利用八阶收敛的牛顿迭代方法对 Fast-ICA 算法进行优化，通过仿真验证了基于八阶收敛的 Fast-ICA 算法与传统的 Fast-ICA 和五阶收敛的 Fast-ICA 算法在分离性能上基本相同，但其具有更少的迭代次数和更快的收敛速率[29]。Fast-ICA 算法通过固

定点迭代求解优化问题： $\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{E}[\mathbf{x}g(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x})] - \mathbf{E}[g'(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x})]\mathbf{w}_k$ 。

PCA 通过特征值分解协方差矩阵  $\mathbf{C}_x = \mathbf{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^T]$ 。提取最大方差方向作为主成分，其数学本质是正交投影： $\mathbf{y} = \mathbf{U}^T \mathbf{x}$ ，其中  $\mathbf{U}$  由协方差矩阵的特征向量构成。PCA 仅利用二阶统计量，适用于高斯分布数据，但无法分离高阶依赖关系。

最大似然估计通过最大化似然函数  $\mathcal{L}(\mathbf{W}) = \prod_{t=1}^N p_s(\mathbf{W}\mathbf{x}(t)) |*det(\mathbf{W})|$  进行参数估计，需假设源信号的概率密度函数  $p_s(\cdot)$ 。该方法对模型误设敏感，但理论上具有统计一致性。表 1 为各主流算法的优缺点对比。

**Table 1.** Comparison of advantages and disadvantages of mainstream BSS algorithms

**表 1.** BSS 主流算法的优缺点对比

算法类型	优点	缺点
Fast-ICA	收敛速度快(牛顿法二阶收敛)，适用于非高斯信号	易陷入局部最优，对初始值敏感
自然梯度 ICA	利用信息几何中的黎曼流形结构，稳定性强于普通梯度下降	计算复杂度高，需调整学习率防止震荡
EASI 算法	在线递归更新解混矩阵，适合实时处理	对噪声敏感，需预知源信号数目
PCA	计算高效，可作为 ICA 预处理步骤(白化)	仅能提取正交基，无法处理非线性混合或非高斯信号
非线性 PCA	通过核方法或神经网络建模非线性关系，表达能力更强	易过拟合，训练数据需求量大

综上所述，BSS 是一种基于统计独立性和非高斯性假设的信号恢复技术，其数学基础清晰，应用范围广泛。随着算法理论的不完善和技术手段的进步，BSS 在实际工程中的表现也日益提升，成为现代信号处理领域的重要工具之一[22]。

## 2.2. 传感器技术的设计原则

传感器作为数据采集的核心组件，其性能直接影响系统的稳定性、可靠性与扩展性。为适应复杂多变的应用场景，现代传感器技术需遵循特定的设计原则，并根据工作原理进行科学分类。设计原则见表 2。

传感器技术的设计原则体现了其从硬件到软件、从微观到宏观的系统性优化。微型化与低功耗技术突破了传统传感器的部署限制，而多模态分类体系则为社会问题提供了多样化的解决方案。未来，随着盲信号分离技术的发展，传感器将进一步向智能化、自适应化方向演进。

## 2.3. 数据预处理与盲信号分离的联合优化策略

在实际应用中，传感器采集的数据往往受到噪声干扰、时间不同步、校准误差等因素的影响[45]。因此，有效的数据预处理方法对于提高 BSS 算法的性能至关重要。常见的预处理步骤包括：

**去噪与滤波：**采用小波变换、中值滤波、自适应滤波等方法去除高频噪声。例如，WT-FFDNet 模型通过多级小波分解与深度学习框架结合，在 Urban100 数据集上实现 PSNR 26.11、SSIM 0.7842 的去噪效果[46]；自适应中值滤波器(AMF)通过动态调整窗口大小(如  $3 \times 3$  至  $11 \times 11$ )，在 60%椒盐噪声污染下仍能保留 Lena 图像细节[47]。

**特征提取与降维：**使用主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等方法降低数据维度。例如，深度学习结合小波分解的 UDiFF 模型通过最优小波变换生成紧凑频域表示，显著提高三维形状生成任务性能[48]。

Table 2. Design principles of sensor technology

表 2. 传感器技术的设计原则

设计原则	描述	例子
微型化与集成化	现代传感器技术的核心目标之一是实现微型化与多功能集成[30]。基于 MEMS 技术, 传感器能够将温度、湿度、气压、气体检测等多种功能模块集成于单一芯片上[31]。这种集成化设计显著降低了传感器的物理尺寸和能耗, 使其更易于部署于农田等空间受限的环境中[32]。	MEMS 加速度计不仅体积小[33], 还可通过微纳加工技术[34]实现高精度力学参数测量。
低功耗与长续航	在电力供应受限的地区, 传感器的低功耗特性至关重要。硬件层面需采用超低功耗芯片, 并通过动态电源管理技术优化能耗。软件层面则需设计节能协议。此外, 可再生能源(如太阳能、超电容)的引入进一步提升了节点的可持续性。	在偏远地区或移动飞行器中, 针对飞行员颈部挥鞭伤(Whiplash injuries)的防护系统需兼顾低功耗与高可靠性。例如, 基于加速度传感器的监测装置可实时捕捉颈部动态, 仅在检测到异常加速度(如高 G 载荷引发挥鞭伤风险)时触发控制器动作, 收紧约束绳索以限制头部过度运动[35]。
高灵敏度与抗干扰能力	在复杂地理环境中, 传感器需具备高分辨率与抗噪能力。例如, 光学传感器在作物生长监测中需区分微弱的光谱反射差异[36]。为此, 现代传感器采用自适应校准算法与数字滤波技术。此外, 冗余设计(如部署多个同类型传感器)可增强系统的鲁棒性, 避免单点故障导致的数据丢失。	港珠澳大湾区发展“纽带”——港珠澳大桥[37]的运维系统部署了震动传感器、压差变形测量仪及三维超声风速仪等多种设备, 用于实时监测隧道内的风速、温湿度、压力及微颗粒浓度等参数。同时通过工业以太网与 TCP/IP 双链路传输数据, 避免单点故障导致监测失效[38]。
成本效益与可扩展性	大规模部署需求驱动传感器向低成本、标准化方向发展。硬件设计中, 采用通用接口(如 I <sup>2</sup> C、SPI)可兼容多种传感模块, 降低定制化成本。软件层面, 开发者可根据应用需求灵活组合功能组件(如任务调度、网络协议栈), 从而缩短开发周期。此外, 规模化生产与材料创新(如柔性基板)进一步降低了单位成本, 为农业物联网的普及奠定基础[39]。	在实时手语翻译系统[40]在 16 个手部关节点部署 MPU6050 传感器时, 进行与 ESP32-S3 主控 CPU 的即插即用连接[41], 不仅省去了定制化接口电路设计成本, 更使得传感器模块可替换性有所提升。在材料创新方面, 仿生机械结构采用 3D 打印 TPU 材料, 相比传统金属支架, 单件制造成本有所降低。基于 FreeRTOS 的任务调度器实现了数据采集(100Hz)与网络传输(WebSocket/UDP 双协议栈)的模块化配置, 使系统在不同应用场景下的开发周期有所缩短。
鲁棒性与自适应性	传感器网络需在恶劣环境中长期运行, 其鲁棒性设计至关重要。硬件方面, 需选择耐候性强的封装材料(如防水防尘外壳); 软件方面, 需引入自愈机制与冗余路由协议。此外, 自适应算法(如动态调整采样频率)可根据环境变化优化性能, 例如在极端天气下提高数据采集密度以捕捉关键事件。	在野生动物保护区部署狗叫情感识别系统时, 传感器网络需应对高温、暴雨等恶劣环境[42]。硬件层面, 音频采集器采用 TLV320AIC34 芯片, 可以在 85℃ 的高温 and -40℃ 的低温下工作[43]。软件层面, 无线传输模块(基于 XBee 协议)通过冗余路由协议动态选择多条传输路径, 当某条路径因雷击干扰失效时, 自动切换至备用路径[44]。

综上, 通过算法选择(如 AMF、PCA)、参数优化(小波分解层数、主成分保留比例)、流程设计(边缘预处理 + 云端优化)的协同优化, 联合策略已实现落地应用[49]。未来需进一步探索多模态数据增强与边云协同机制的深度整合。

### 3. 应用

#### 3.1. 盲信号分离在农业传感器网络中的应用表现

盲信号分离技术在农业传感器网络中的应用日益广泛, 其核心优势在于无需先验信息即可从混合信号中提取有效目标信号, 为农业复杂环境下的数据采集与处理提供了关键技术支撑。表 3 是其具体应用表现。

**Table 3.** Application performance of blind signal separation in agricultural sensor networks**表 3.** 盲信号分离在农业传感器网络中的应用表现

应用	例子
农田环境监测与数据采集	在农田肥力数据采集系统中, 传感器网络常受环境噪声干扰(如气象波动、设备电磁干扰等)。通过盲信号分离模块, 可利用主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)等算法, 将噪声信号与目标信号(如土壤湿度、养分含量等)分离, 提升数据准确性。例如, 基于数据挖掘的农田肥力分析系统通过盲分离技术实现了对噪声源信号的动态抑制, 显著优化了定标目标信号的质量[50]。此外, 无线传感器网络中混沌信号的盲分离技术也为此类场景提供了支持, 尽管其非线性特性增加了分离难度, 但通过改进算法可有效解决信号量化问题[51]。
畜牧业智能监控	在生猪养殖场场景中, 多麦克风采集的音频信号常包含环境噪音(如风机声、动物杂音)与目标信号(如猪只叫声)。基于稀疏分量分析(SCA)的欠定盲信号分离技术可从混合音频中恢复关键声学特征, 用于健康状态监测或行为分析。此类方法通过多通道信号重构源信号, 以在畜禽舍环境下的异常声音识别中展现潜力[52]。
农作物残茬识别与图像处理	针对农业机械作业后的残茬覆盖率检测问题, 研究者提出结合盲信号分离与彩色图像分析的方法。通过在移动平台上的摄像头采集田间图像, 利用盲分离算法提取残茬特征信号, 进而计算残茬分数, 为保护性耕作评估提供自动化解决方案[53]。

总体而言, 盲信号分离技术通过提升农业传感器网络在噪声抑制、多源信号解耦等方面的能力, 为精准农业的数据质量保障提供了新路径。未来, 随着算法轻量化与边缘计算技术的发展, 其在农业物联网中的实时性与适应性将进一步增强[54]。

### 3.2. MEMS 传感器与 BSS 算法的协同优化

兆易创新推出的 GDY1121 气压传感器是一款典型的高性能 MEMS 器件, 其具备 $\pm 0.5$  hPa 的绝对压力精度和 1 Hz 采样频率下的  $3.5 \mu\text{A}$  低功耗设计, 适用于复杂环境中的长期监测任务[55]。一方面, 基于 MNMF 算法对静态磁序列的高保真分离特性(相关系数达 0.9968), 可设计动态约束机制, 通过实时识别环境噪声特征并自适应调整稀疏约束权重, 增强算法对人员行走扰动与设备振动噪声的鲁棒性。另一方面, 结合 MEMS IMU 多轴传感器数据融合, 利用加速度计与陀螺仪信号辅助构建运动状态感知模型, 为 BSS 算法提供先验约束条件, 有效区分运动伪影与真实磁异常。此外, 针对长期监测中温漂、器件老化等非平稳噪声问题, 可引入在线增量学习策略, 通过滑动时间窗动态更新基向量矩阵  $S$  与丰度矩阵  $A$ , 实现噪声模型的持续校准。实验表明, 该协同优化框架在 30 米楼道动态测试中, 使磁匹配定位概率提升至 95% (步长 3 米), 为地下管廊巡检、智能仓储导航等应用提供了高鲁棒性解决方案[56]。

### 3.3. 远程医疗与乡村健康管理中的 BSS 应用

在远程医疗领域, BSS 技术通过与非接触式传感器的融合, 展现出突破性的应用潜力。以《基于商用 WiFi 设备的多人呼吸监测系统》[57]为例, 该研究提出的 WiMUSE 技术流程通过建模多用户呼吸信号的叠加特性, 结合 BSS 算法实现了高精度的呼吸波形分离, 为家庭场景下的慢性病管理、术后康复监测等提供了低成本解决方案。如图 1 所示, WiMUSE 的核心创新在于将多用户呼吸信号建模为时域波形的线性叠加, 并通过多载波信号构建观测空间, 将问题转化为 BSS 框架下的信号分离任务。

如图 2 所示, 与 MUSIC/FFT 方法相比, WiMUSE 的性能有所提升。这一优势源于 BSS 技术与 WiFi 传感器的深度融合:

**时域建模优势:** 通过线性化处理将呼吸运动映射为波形叠加模型, 突破了传统频域方法对周期性假设的依赖。

**多维信号利用:** 多载波信号提供了独立观测通道, 满足部分 BSS 算法对“观测信号数  $\geq$  源信号数”的要求。

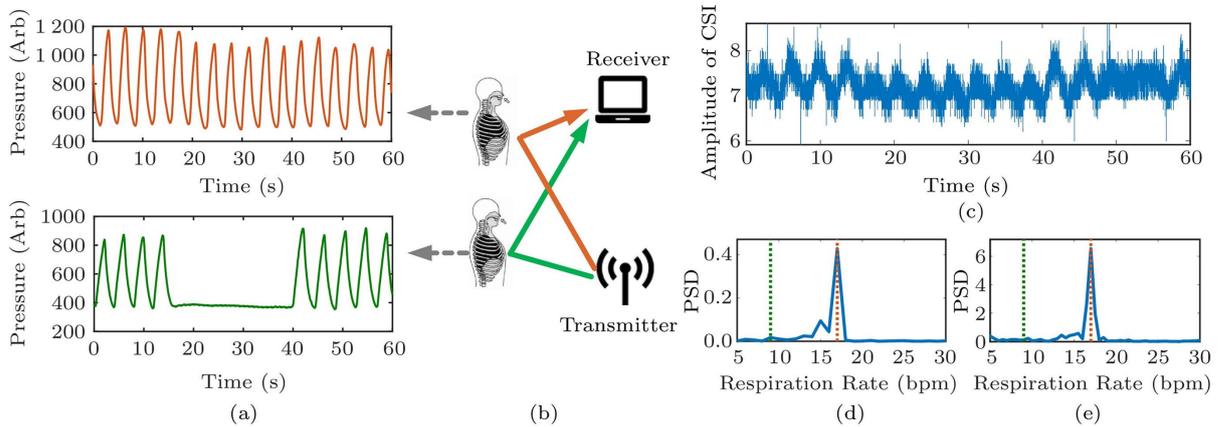


Figure 1. WiMUSE flowchart

图 1. WiMUSE 流程图

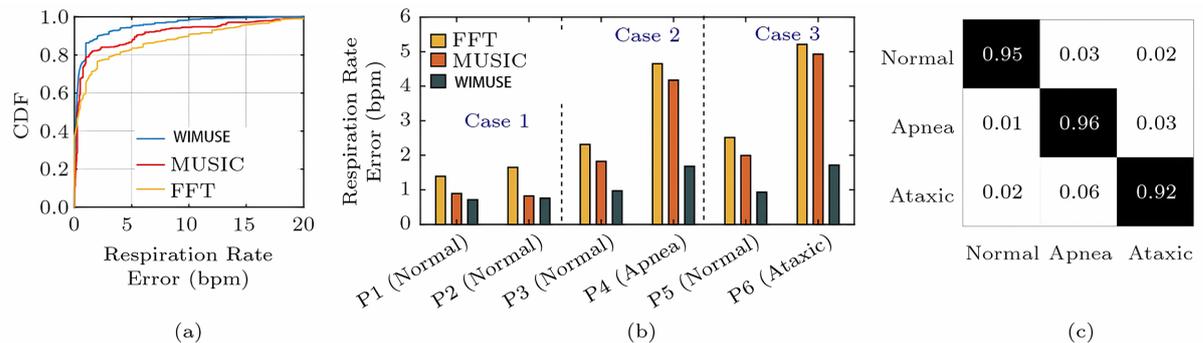


Figure 2. Comparison diagram of performance of WiMUSE/FFT/MUSIC methods

图 2. WiMUSE/FFT/MUSIC 方法的性能对比图

**形态学特征挖掘：**分离后的呼吸波形可进一步用于分析吸气/呼气不对称性、呼吸暂停持续时间等。

综上，WiMUSE 通过 BSS 技术与 WiFi 传感器的协同创新，不仅解决了传统方法在多人场景中的局限性，更推动了非接触式生命体征监测从实验室走向实际应用。其技术框架为远程医疗提供了兼具高精度、低成本和易用性的解决方案[58]。

## 4. 讨论

### 4.1. 技术融合的优势与挑战

BSS 与传感器技术的融合在复杂环境中展现出显著优势。首先，BSS 技术能够有效解决多源信号干扰问题，提高数据采集的准确性和稳定性，尤其适用于复杂环境下的多目标监测需求。其次，MEMS 传感器的小型化、低功耗特性使其易于部署于偏远乡村地区，而 BSS 算法的引入则进一步增强了传感器网络的智能处理能力。此外，结合边缘计算架构，BSS 技术还可实现实时数据分析与决策支持，为农业生产、环境治理、健康监测等提供可靠保障。

然而技术融合在实际应用中仍面临诸多深层次挑战。首先，基础设施薄弱仍是制约技术落地的关键因素之一[59]。特别是在偏远地区和复杂地理环境中，网络覆盖不稳定[60]、电力供应不足[61]等问题严重影响了传感器网络的大规模部署与高效运行。这不仅限制了数据的实时采集与传输，也对系统的整体稳定性构成威胁。为应对这一问题，未来应加大基础建设投入，推动 5G 网络与低轨卫星通信的协同发展[62]，同时发展自供电式传感器节点和能源收集技术[63]，以提升系统在复杂环境下的可持续运行能力。

其次, BSS 算法在现实场景中的性能受限于噪声干扰和信号质量不佳的问题。尤其是在工业现场或城市复杂电磁环境中, 非高斯噪声、混响效应及信道畸变等因素会导致信号失真, 从而影响算法的分离精度与稳定性[22]。对此, 需从算法层面进行优化, 例如引入深度学习方法增强其在低信噪比条件下的鲁棒性[64], 或结合稀疏表示与时频分析提升其抗干扰能力[65]。

此外, 传感器成本与精度之间的矛盾也不容忽视。尽管 MEMS 传感器具备体积小、功耗低等优势, 但高端产品仍依赖进口, 价格高昂。因此, 加快国产化研发进程, 突破关键技术瓶颈, 是实现大规模部署的前提[66]。

最后, 边缘计算与分布式训练架构的构建, 将有助于降低数据传输压力并提高处理效率; 而跨学科协作与国际标准的参与, 则是提升我国技术竞争力和话语权的重要路径[67]。

## 4.2. 政策支持与未来发展趋势

在技术融合向实际应用转化的过程中, 政策环境与产业生态的协同作用日益凸显。“信号升格”专项行动[68]、千兆光网工程[69]等政策举措为社会通信基础设施的完善提供了有力支撑。此外, 地方政府也在积极推动智慧农业示范项目, 如安徽省长丰县草莓全产业链数字化项目[70]等, 均取得了良好成效。

未来, 随着 5G、AIoT(人工智能物联网)、边缘计算等技术的深入发展, BSS 与传感器技术将在更多社会应用场景中发挥作用。例如, 在农产品物流管理中, 结合 BSS 与传感器数据的动态调度系统可实现对运输过程的实时监控与优化; 在灾害预警系统中, 多源传感器融合与信号分离技术可提高监测精度, 提前发现潜在风险。因此, 建议相关机构加大研发投入, 推动产学研协同创新, 助力国家发展[71]。

## 5. 结论

本文系统综述了盲信号分离(BSS)与传感器技术在社会中的应用现状与发展趋势。研究发现, BSS 技术能够有效提升多源信号处理的精度与鲁棒性, 尤其在复杂环境下仍然具备较强的适应能力。同时, MEMS 传感器的微型化、低功耗、高精度特性使其成为物联网的理想选择, 而两者的联合优化策略则进一步拓展了应用场景。

尽管目前仍存在基础设施薄弱、算法适应性不足等瓶颈, 但通过政策支持、技术创新与跨学科合作, 有望逐步突破现有难题。未来研究应聚焦于轻量化 BSS 算法开发、低成本高精度传感器研制、边缘计算架构优化等方面, 推动 BSS 与传感器技术在智能化基础设施建设中的深度应用, 为国家发展提供坚实支撑[72]。

## 基金项目

这篇论文得到了以下资金的资助: 1) 广东省科技创新战略专项资金(No. pdjh2022b0598); 2) 广东省科技创新战略专项资金(No. pdjh2024a467); 3) 广东省教育厅普通高校特色创新项目(自然科学)(No. 2024KTSCX131)。

## 参考文献

- [1] 于海澜. 数控技术的发展趋势[J]. 湖南农机, 2012, 39(5): 126, 128.
- [2] Kahraman, C. and Haktanir, E. (2023) Intelligent Systems in Digital Transformation. Springer International Publishing. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-16598-6>
- [3] 智造苑. 智能感知技术[EB/OL]. [https://www.cii.com.cn/lhrh/hyxx/202305/t20230512\\_3957048.html](https://www.cii.com.cn/lhrh/hyxx/202305/t20230512_3957048.html), 2025-05-03.
- [4] 陈兴, 邴超. 面向电力设施的无人机多目标监测与反制系统[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 220-224.

- [5] 王连喜, 蒋盛益. 基于 CNKI 和 WoS 的国内与国际涉华舆情研究对比分析[J]. 情报探索, 2019(10): 116-124.
- [6] 祝小蜜, 温琦霖. 一种基于单片机的蓝牙医疗设备网关的软件设计[J]. 电子制作, 2022, 30(10): 14-19.
- [7] 祝小蜜, 温琦霖. 一种基于单片机的蓝牙医疗设备网关的硬件设计[J]. 电子制作, 2022, 30(9): 11-15.
- [8] 王裕堯, 岑盈静, 陈苑冰, 李慕尧, 邢赫. 一种基于 ESP8266 的智能在线辐射监测系统设计[J]. 中国科技信息, 2024(21): 121-124.
- [9] 廖秀娟, 蔡俊发, 刘智莹. 常态化疫情防控形势下高校学生工作管理模式的对策研究——以广州商学院为例[J]. 就业与保障, 2021(3): 185-186.
- [10] 廖琪. 高校辅导员在高职院校易班平台的意见领袖角色研究[J]. 国际公关, 2022(21): 151-153.
- [11] 张朝霞, 关俊明, 熊茂华. 基于智能区块链技术的高校辅导员绩效评估体系架构的研究[J]. 信息记录材料, 2022, 23(11): 98-101.
- [12] 吴晓玲, 姜灵敏, 张连堂, 等. 大数据技术下面向企业需求的高校应用型人才培养课程体系设计[J]. 计算机教育, 2020(1): 86-92.
- [13] Lin, Q., Zhang, Z. and Peng, M. (2024) Research on the Emotion of “College Students’ Employment” Based on Online Reviews. In: Agarwal, N., Birkök, M.C., Casero-Ripollés, A., Ibáñez, D.B., Khan, I.A., et al., Eds., 2024 5th International Conference on Modern Education and Information Management (ICMEIM 2024), Atlantis Press, 234-239. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icmeim-24/126005367>
- [14] 黄太素. 基于强化学习的端边云 3C 资源联合优化策略研究[D]: [硕士学位论文]. 广东技术师范大学, 2023.
- [15] 邵智宝, 黄文标, 陈洪军. 电子邮件——新一代网商[J]. 中国邮政, 2005(3): 45-46.
- [16] 李长龙. 面向对象的沙化土地 GF-1 遥感分类技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 中国林业科学研究院, 2016.
- [17] 王鹏程, 彭光文, 吕安琪, 郭念民, 王远. 连续介质区近地表建模方法应用研究[C]//中国石油学会石油物探专业委员会. 第三届中国石油物探学术年会论文集(一). 北京: 石油工业出版社, 2025: 405-408.
- [18] Khan, A., Li, J.P., Khan, M.Y. and Alam, R. (2020) Complex Environment Perception and Positioning Based Visual Information Retrieval. *International Journal of Information Technology*, **12**, 409-417.
- [19] 郭洁, 莫建明, 冯世景, 等. 基于 IOT 技术的现代农业产业控制系统探究[J]. 农业产业化, 2024(12): 46-48.
- [20] 顾廷炜, 汤明宏, 孙晓冬. 智能传感器技术应用现状与发展趋势综述[J]. 物联网技术, 2025, 15(1): 59-63.
- [21] 岳祺. 电子信息监测仪器的精准检测技术创新[C]//天津中宸睿信科技发展有限公司. 天津市电子学会. 第三十八届中国(天津)2024 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集. 天津: 天津科学技术出版社, 2024: 35-38.
- [22] 周治宇, 陈豪. 盲信号分离技术研究及算法综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(10): 16-20, 31.
- [23] Huang, L., Wang, Z., Zhao, L., Zhao, D., Wang, C., Xu, Z., et al. (2010) Electrical Signal Measurement in Plants Using Blind Source Separation with Independent Component Analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, **71**, S54-S59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.014>
- [24] 潘伟豪, 盛卉子, 王春宇, 等. 基于欠定盲源分离和深度学习的生猪状态音频识别[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(5): 730-742.
- [25] 李赵春, 周永照, 冯卫奔, 等. 基于 Transformer 模型的手势脑电信号分类识别[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2044-2050.
- [26] 李军, 李虎林. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2147-2158.
- [27] 尹晶凡. 水声信号盲源分离技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [28] 杨斌, 王斌. 光谱解混技术及其应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 68-95.
- [29] 陈梦, 何选森. 基于八阶收敛牛顿迭代的 Fast-ICA 改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(11): 178-181, 251.
- [30] 饶夫基. 传感器技术现状和发展动向[J]. 国外自动化, 1986(1): 50-54.
- [31] Mishra, M.K., Dubey, V., Mishra, P.M. and Khan, I. (2019) MEMS Technology: A Review. *Journal of Engineering Research and Reports*, **4**, 1-24.
- [32] 潘春霞. 基于 MEMS 技术的农业自动浇灌系统[P]. 中国专利, CN103168659A. 2013-06-26.
- [33] 青岛智腾微电子. 石英挠性加速度计和 MEMS 加速度计的工作原理及比较[EB/OL]. <https://www.ztmicro.com/news-zx/2023-04-19/340/>, 2025-05-05.
- [34] MEMS 微纳加工技术: 原理、工艺与应用全解析[EB/OL]. <https://www.bymicrofab.com/hydt/184.html>, 2025-05-05.
- [35] 赵辉, 尹志勇, 杨光瑜, 陈蓉, 王立军, 王正国. 头颈部损伤防护装置[P]. 中国专利, CN102407943A. 2012-04-11.

- [36] 王娇娇, 徐波, 王聪聪, 等. 作物长势监测仪数据采集与分析系统设计及应用[J]. 智慧农业, 2019, 1(4): 91-104.
- [37] 广东省交通运输厅. 粤港澳大桥日益成为大湾区发展“纽带”[EB/OL]. [https://td.gd.gov.cn/dtxw\\_n/tpxw/content/post\\_4510897.html](https://td.gd.gov.cn/dtxw_n/tpxw/content/post_4510897.html), 2025-05-05.
- [38] 腾讯云开发者社区-腾讯云. 数字孪生港珠澳大桥: 大湾区综合管理信息系统[EB/OL]. <https://cloud.tencent.com/developer/article/1998980>, 2025-05-05.
- [39] 刘阳. 我国农业物联网发展问题浅析与对策研究[J]. 物联网技术, 2016, 6(2): 90-91.
- [40] 王仁强, 宋鹏. 基于多传感器融合与云端协同的实时手语翻译系统设计[J/OL]. 物联网技术: 1-6. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=WLWJ20250421008>, 2025-05-05.
- [41] 统一配网-ESP32-S3——ESP-IDF 编程指南 v5.4.1 文档[EB/OL]. [https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/zh\\_CN/stable/esp32s3/api-reference/provisioning/provisioning.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/zh_CN/stable/esp32s3/api-reference/provisioning/provisioning.html), 2025-05-05.
- [42] 杨春勇, 侯金, 陈少平, 等. 动物声音情绪识别系统及其方法[P]. 中国专利, CN104700829A. 2015-06-10.
- [43] TLV320AIC34 Four-Channel, Low-Power Audio Codec for Portable Audio and Telephony. <https://www.ti.com/product/TLV320AIC34#params>
- [44] Digi XBee®快速重新设计服务[EB/OL]. <https://zh.digi.com/products/iot-software-services/wireless-design-services/development/xbee-rapid-redesign-services>, 2025-05-05.
- [45] 叶鸿瑾, 李祥生, 满晰, 等. 基于小波变换的图像去噪方法的研究[J]. 数学的实践与认识, 2009(23): 137-141.
- [46] 刘帅骞. WT-FFDNet: 引入小波卷积的图像去噪网络[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(2): 392-400.
- [47] 潦草通信狗. 图像去噪的艺术: 自适应中值滤波器的应用与实践[EB/OL]. (2024-09-11) [https://blog.csdn.net/m0\\_59100678/article/details/142124142](https://blog.csdn.net/m0_59100678/article/details/142124142), 2025-05-13.
- [48] Zhou, J., Zhang, W., Ma, B., Shi, K., Liu, Y.S. and Han, Z. (2024) UDiFF: Generating Conditional Unsigned Distance Fields with Optimal Wavelet Diffusion. arXiv: 2404.06851. <http://arxiv.org/abs/2404.06851>
- [49] TWS 耳机通话降噪成趋势: 六大算法厂商推出 18 种解决方案[EB/OL]. <https://www.52audio.com/archives/76584.html>, 2025-05-13.
- [50] 陈鹏, 宋良图, 王儒敬, 等. 基于数据挖掘的农田肥力数据采集分析系统[P]. 中国专利, CN103092142A. 2013-05-08.
- [51] 聂立文. 混沌信号在无线传感器网络中的盲分离[J]. 信息记录材料, 2017, 18(7): 78-79.
- [52] 彭硕, 陶亮, 查文文, 等. 基于稀疏分量分析的生猪音频欠定盲源分离研究[J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(7): 2794-2809.
- [53] 赫尔实验室有限公司. 使用彩色图像的盲源分离确定农作物残茬分数的系统和方法[P]. 中国专利, CN111868782A. 2024-01-02. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD202401&filename=CN111868782B>
- [54] 程序边界. DeepSeek 在物联网设备中的应用: 通过轻量化模型实现本地化数据分析[EB/OL]. (2025-04-23) [https://blog.csdn.net/qq\\_32682301/article/details/147455902](https://blog.csdn.net/qq_32682301/article/details/147455902), 2025-05-05.
- [55] 电子产品世界. 从楼层定位到水下探测: 兆易创新 MEMS 气压传感器的无限可能[EB/OL]. (2025-04-17) <https://finance.sina.com.cn/tech/roll/2025-04-17/doc-inetmqf3800998.shtml>, 2025-05-05.
- [56] 孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 等. MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): 1-15. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230186>, 2025-05-05.
- [57] 伊恩泽, 牛凯, 张扶桑, 等. 基于商用 WiFi 设备的多人呼吸监测系统[J]. 计算机科学技术学报, 2025, 40(1): 229-251.
- [58] 白春学, 虞明, 印洁, 等. 远程呼吸监护医疗系统[P]. 中国专利, CN201453268U. 2010-05-12.
- [59] 国务院关于加强城市基础设施建设的意见[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zwgc/2013-09/16/content\\_2489070.htm](https://www.gov.cn/zwgc/2013-09/16/content_2489070.htm), 2025-05-05.
- [60] 工业和信息化部答网民关于“村里网络覆盖不到、信号差, 上网课不便利”问题的留言[EB/OL]. [https://www.gov.cn/hudong/2020-08/11/content\\_5533983.htm](https://www.gov.cn/hudong/2020-08/11/content_5533983.htm), 2025-05-05.
- [61] 央视网. 国家能源局: 多措并举应对南方部分地区电力供应偏紧[EB/OL]. <https://news.cctv.com/2020/12/18/ARTInfNhcOK6xcWXmTJYvYiG201218.shtml>, 2025-05-05.
- [62] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发“十四五”信息通信行业发展规划的通知[EB/OL]. (2021-11-01)

- 
- [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/16/content\\_5651262.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/16/content_5651262.htm), 2025-05-13.
- [63] 旭时, 王敏敏. 摩擦电纳米发电机自驱动传感体系研究进展[J]. 分析化学进展, 2022, 12(3): 254-265.
- [64] Luo, W., Yang, R., Jin, H., Li, X., Li, H. and Liang, K. (2022) Single Channel Blind Source Separation of Complex Signals Based on Spatial-Temporal Fusion Deep Learning. *IET Radar, Sonar & Navigation*, **17**, 200-211. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12333>
- [65] 王翔, 赵雨睿. 电磁信号单通道盲分离方法的发展、应用与展望[J]. 电气工程, 2020, 8(4): 158-170.
- [66] 传感器专家网. 国产公司大部分小于 1%! 国外巨头瓜分中国 MEMS 市场, 国产还能崛起? [EB/OL]. (2023-05-16). <https://zhuanlan.zhihu.com/p/629884702>, 2025-05-05.
- [67] 赖攀君, 郑裕田, 连小燕. 我国参与国际标准制定面临的困难问题及对策建议——基于广州市黄埔区的实践[J]. 中国标准化, 2025(1): 129-132.
- [68] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 教育部, 等. 工业和信息化部等十一部门关于开展“信号升格”专项行动的通知[EB/OL]. (2023-12-27) [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content\\_6924256.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924256.htm), 2025-05-05.
- [69] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《“双千兆”网络协同发展行动计划(2021-2023 年)》的通知[EB/OL]. (2021-03-24) [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content\\_5595693.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595693.htm), 2025-05-05.
- [70] 安徽网信网. 长丰县“三个一”, 打造数字草莓产业新模式[EB/OL]. [https://www.ahwx.gov.cn/szxc/dxal/202206/t20220623\\_6098053.html](https://www.ahwx.gov.cn/szxc/dxal/202206/t20220623_6098053.html), 2025-05-05.
- [71] 朝着建成科技强国的宏伟目标奋勇前进[J]. 求知, 2025(4): 4-7.
- [72] 中国政府网. 现代化基础设施体系加快构建[EB/OL]. [https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/20/content\\_5719971.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/20/content_5719971.htm), 2025-05-05.