

基于高空作业环境的声纹信号自适应滤波与特征增强算法研究

吴赞¹ 沈自珍^{2*} 沈嘉军³

1. 浙江大合检测有限公司, 中国·浙江 杭州 311122

2. 浙江建设职业技术学院, 中国·浙江 杭州 311231

3. 浙江理工大学, 中国·浙江 杭州 310018

摘要: 在高海拔作业环境中, 语音信号检测受到风噪、机械噪声以及开阔空间中的多径效应等复杂干扰的影响, 严重降低了目标语音特征的识别性能。传统滤波方法无法同时实现稳态噪声抑制和瞬态语音特征保留。为解决这一问题, 提出了一种联合自适应滤波与特征增强算法, 以提升高海拔作业场景下的语音识别可靠性。在自适应滤波阶段, 基于可变步长最小均方误差 (VSSLMS) 准则构建滤波器, 并引入了环境感知系数动态调整策略。该策略使滤波器能够根据实时风噪强度和机械噪声频谱动态调整收敛步长, 从而有效抑制背景噪声, 避免信号失真。在特征增强阶段, 设计了联合时频掩蔽与频谱减法框架, 对滤波后的信号进行初步降噪处理。随后采用深度神经网络, 从残留的噪声中重建语音特征的残余信息, 从而恢复被噪声掩盖的弱特征成分。实验在模拟的高原作业平台上采集了多条件数据, 涵盖不同风速、机械噪声水平和语音目标。结果表明, 所提算法在低信噪比条件下可使目标语音特征清晰度提升约 40%, 在特征保真度方面优于传统的频谱减法和固定步长 LMS 方法, 并对突发风噪变化及机械冲击噪声具有良好的鲁棒性。该方法有效解决了高原作业语音特征检测中的自适应滤波与特征增强问题, 为高原设备故障预警和人员安全监测提供了可靠的声学传感方案。

关键词: 高原作业; 语音特征信号; 自适应滤波; 特征增强; 可变步长 LMS; 深度神经网络; 信噪比提升

Research on Adaptive Filtering and Feature Enhancement Algorithm for Voice Signal in High-Altitude Working Environments

Wu Yun¹, Shen Zizhen^{2*}, Shen Jiajun³

1. Zhejiang Dahé Testing Co., Ltd., China Zhejiang Hangzhou 311122

2. Zhejiang Construction Vocational & Technical College, China Zhejiang Hangzhou 311231

3. Zhejiang Sci-Tech University, China Zhejiang Hangzhou 310018

Abstract: In high-altitude working environments, voice signal detection is severely affected by complex interferences such as wind noise, mechanical noise, and multipath effects in open spaces, significantly degrading the recognition performance of target speech features. Traditional filtering methods fail to simultaneously suppress steady-state noise and preserve transient speech characteristics. To address this issue, a joint adaptive filtering and feature enhancement algorithm is proposed to improve speech recognition reliability in high-altitude operational scenarios. During the adaptive filtering stage, a filter based on the variable step-size least mean square (VSSLMS) criterion is constructed, incorporating a dynamic adjustment strategy for environmental awareness coefficients. This strategy enables the filter to dynamically adjust its convergence step size according to real-time wind noise intensity and mechanical noise spectrum, effectively suppressing background noise while avoiding signal distortion. In the feature enhancement stage, a combined time-frequency masking and spectral subtraction framework is designed to perform preliminary noise reduction on the filtered signal. Subsequently, a deep neural network is employed to reconstruct residual speech feature information from remaining noise, thereby recovering weak feature components masked by noise. Experiments were conducted using data collected from a simulated plateau work platform under various conditions, including different wind speeds, levels of mechanical noise, and speech targets. Results show that the proposed algorithm improves the clarity of target speech features by approximately 40% under low signal-to-noise ratio (SNR) conditions, outperforming traditional spectral subtraction and fixed-step LMS methods in terms of feature fidelity. The method also demonstrates strong robustness

against sudden changes in wind noise and mechanical impact noise. This approach effectively solves the challenges of adaptive filtering and feature enhancement in speech feature detection at high altitudes, providing a reliable acoustic sensing solution for early fault warning of plateau equipment and personnel safety monitoring.

Keywords: High-altitude operation; Speech feature signal; Adaptive filtering; Feature enhancement; Variable step-size LMS; Deep neural network; SNR improvement

0 引言

 钻高空作业场景受强风干扰、复杂机械振动、开放空间多径效应等多重因素影响，作业设备与人员的监测声纹信号极易被噪声掩盖、信噪比大幅降低，给设备故障预警与人员安全监护带来极大挑战^[1-3]。当前主流监测技术存在明显短板，无人机热红外影像等视觉与非声学传感手段仅能识别结构、温度类缺陷，无法捕捉声学细微动态变化，且存在视角盲区与响应延迟问题；传统声纹处理算法仅适用于稳态噪声抑制，对高空场景频发的瞬态风噪、机械冲击等非平稳干扰适配性差，易造成信号特征失真。从国内外研究现状来看，现有自适应滤波算法、时频掩蔽方法与深度神经网络声纹增强技术虽已实现技术迭代，但仍存在明显局限性：变步长自适应滤波算法未结合高空风速、机械振动等环境参数协同调节，在多源时变干扰场景中易出现响应滞后、过度抑制等问题；时频掩蔽技术难以适配高空宽频谱风噪与多径干扰特性，无法精准构建理想掩蔽模型；深度学习模型多基于常规场景数据集训练，对高空特有复杂噪声的泛化能力不足，且行业尚未形成适配高空作业场景的声纹自适应滤波与特征增强联合处理框架^[4]。基于对比（见表 1），本文针对高空作业复杂时变的噪声特性，研究适配该场景的声纹信号自适应滤波与特征增强算法，可有效弥补现有感知技术的短板，对提升高空作业设备故障预警精度、强化人员安全监护可靠性，具有重要的理论研究价值与工程应用意义。

表1 各高空作业环境的声纹信号技术方法比较

技术方法	适用场景	稳态噪声抑制能力	瞬态信号保留能力	自适应环境参数能力
传统谱减法	准稳态噪声环境	良好	较差	无
固定步长 LMS	统计特性平稳噪声	中等	中等	无
变步长 LMS	时变噪声环境	较好	较好	弱（基于残差信号）
深度神经网络增强	特定噪声类型	优秀	优秀	弱（依赖训练数据）

1 自适应滤波算法设计与实现

1.1 变步长最小均方误差滤波器的构建

 针对高空作业低信噪比环境下稳态噪声与瞬态声纹之

间的矛盾，构建变步长最小均方误差（LMS）滤波器乃是自适应滤波阶段的核心环节^[5-6]。传统固定步长 LMS 算法难以兼顾收敛速度与稳态失调，而变步长策略能够借助动态调整步长因子来实现噪声抑制与信号保真的平衡。参考系留高空风筝系统动力学建模中对参数耦合影响的分析方法，系统在不同风速、绳长等条件下会呈现显著的非线性动态特性，变步长滤波器同样需要依据环境参数实时优化步长调整规则。该滤波器中，以最小均方误差为准则，构建输入信号向量与期望响应之间的误差函数，步长因子 μ 被定义为瞬时误差能量与输入信号功率的比值函数，使得误差较大时步长快速收敛、误差较小时步长精细调节。具体实现上，运用 Sigmoid 函数映射形式，将归一化误差借助非线性变换转换为平滑的步长更新值，避免传统分段函数所带来的突变问题。滤波器系数 $W(n)$ 的更新公式为 $W(n+1)=W(n)+\mu(n)e(n)X(n)$ ，其中 $\mu(n)$ 会基于环境参数感知模块输出的实时信噪比估计以及噪声频谱特征进行动态修正。该设计利用变步长机制在抑制风噪低频分量与机械噪声脉冲的同时，保留声纹信号中的瞬态细节，为后续特征增强提供高质量输入。

1.2 基于环境参数感知的滤波系数动态调节策略

 上述变步长策略虽能依据误差能量动态调整步长，但其调节依据仅来自瞬时误差与输入功率，尚缺乏对风噪突变、机械冲击等环境参数变化的直接响应能力。在塔式起重机这类高空作业场景中，传感器阵列能够同步采集风速、振动加速度以及声压级等多维数据，这些信息为构建基于环境参数感知的滤波系数调节机制提供了物理基础^[7]。具体而言，将实时采集的风速参数 $v(t)$ 与机械振动加速度 $a(t)$ 完成归一化后，构造环境感知因子 $\beta(t)=\alpha \cdot v(t)+\gamma \cdot a(t)$ ，其中 α 和 γ 为权重系数，借助离线标定来确定。该因子与瞬时误差能量 $e^2(t)$ 共同决定动态调节步长： $\mu(t)=\mu_0 \cdot [1+\lambda \cdot \beta(t)] \cdot f(e^2(t))$ ，这里 μ_0 为基础步长， λ 为环境敏感系数， $f(\cdot)$ 为 Sigmoid 型映射函数。当环境参数因子 $\beta(t)$ 增大时，步长会相应增加，以应对风噪突变或机械冲击所引发的输入信号剧烈波动，从而加速滤波器收敛；当 $\beta(t)$ 较小时，步长回归基础值，以保持稳态噪声的抑制精度。这种调节机制使滤波器在低信

噪比条件下（如 SNR 低于 -5dB）能够显著抑制风噪能量，同时避免了传统方法在噪声突变时出现的发散现象。此外，借助环境参数感知，滤波系数的更新不再单纯依赖信号统计特性，而是融合了物理环境变化，进而增强了算法对高空作业实时干扰场的适应性，为后续特征增强环节提供了更干净的信号基底。

2 目标声纹特征增强方法

2.1 时频掩蔽与谱减联合增强框架

滤波后的信号虽有效抑制了背景噪声，但开放空间多径效应以及机械脉冲干扰导致的声纹细节损失仍显著。为此，构建时频掩蔽与谱减联合增强框架，旨在从时频域捕捉被掩蔽的弱特征分量。该框架首先对变步长 LMS 滤波输出进行短时傅里叶变换，得到时频域表示。在谱减阶段，依据噪声估计的功率谱密度，运用过减因子与噪声平滑参数对信号幅度谱进行非线性修正，重点抑制宽带平稳噪声残余。谱减后的信号虽提升了信噪比，但可能引入音乐噪声和瞬态谱失真，尤其在多径衰落导致的频率选择性深衰区域。因此，引入时频掩蔽机制，借助声纹信号在时频平面上的局部连续性，计算基于信号存在概率的软掩蔽值，并对谱减结果进行二次加权，保留目标声纹的谐波结构与瞬态跳变。该联合框架依靠迭代优化掩蔽阈值与谱减参数，实现噪声抑制与信号畸变的平衡。值得注意的是，在表征损伤定位的空间特征提取方法中，多视角几何三维重建技术已展现出对复杂环境噪声的鲁棒性^[8]，其核心理念可为声纹时频空间特征的关联建模所借鉴，以增强框架对开放场域多径效应的适应能力。

2.2 基于深度神经网络的残差特征重构

经过时频掩蔽以及谱减联合处理后，残余噪声中仍包含被掩盖的弱声纹细节，尤其在低信噪比下，声纹的瞬态谐波与共振峰结构难以被完全恢复。为了进一步提升声纹细节的重构精度，设计了基于深度神经网络的残差特征重构模块，目的在于学习从含噪残差到纯净声纹特征的映射关系。该模块运用带有跳跃连接的编码器-解码器架构，将时频掩蔽后的时频谱作为输入，借助多层卷积提取时频特征中的局部与全局模式，并估计纯净声纹的残差分量。在训练过程中，借助高空作业场景下采集的多工况数据，构造包含风噪突变以及机械噪声脉冲的混合噪声样本，从而使网络能够学习到对不同类型噪声的鲁棒重构能力。实验结果显示，该模块在信噪比低于 -5dB 时，可以将声纹的 MFCC 特征保真度提升约 25%，并有效恢复被噪声掩盖的弱特征分量。结合多源感知融合技术，比如将声纹数据

以及杆塔数字化模型、RTK 定位信息进行联合分析，能够进一步提高高空作业安全监控的可靠性^[9]。

3 实验验证与性能分析

3.1 实验平台与数据集构建

实验平台搭建于某在建高层建筑的外部悬挑作业区域，地面高度约 45 米，模拟典型高空作业环境，平台配备定向麦克风阵列（采样率 48kHz，灵敏度 -38dBV/Pa）以及多通道数据采集卡，同时部署风速计（精度 $\pm 0.3\text{m/s}$ ）及加速度传感器（用于监测机械振动），为覆盖不同噪声强度，设定三档风速（5m/s、10m/s、15m/s）与两种机械噪声等级（低：空载电梯运行噪声；高：电钻冲击噪声），并采集七类目标声纹（包括人员呼喊、工具碰撞、设备异常轰鸣等），每类声纹在每种工况下重复录制 30 秒，获得 630 组原始信号，部分样本经人工裁剪后构建数据集，数据集按信噪比区间划分为低（-10dB 至 -5dB）、中（-5dB 至 0dB）、高（0dB 至 5dB）三组（见表 2），用于评估算法在不同退化程度下的表现。

表2 信噪比数据集

工况编号	风速(m/s)	机械噪声等级	目标声纹类型数	样本总数	平均信噪比(dB)
C1	5	低	7	210	-2.3
C2	5	高	7	210	-5.8
C3	10	低	7	210	-4.1
C4	10	高	7	210	-7.6
C5	15	低	7	210	-6.0
C6	15	高	7	210	-9.2

鉴于该数据集，能够系统性地评估算法对风噪突变与机械冲击噪声的鲁棒性。在低信噪比工况下，比如 C6，目标声纹的时频细节严重退化，这种情况与高空视角下小目标检测所面临的遮挡和背景复杂问题相类似，都需要借助跨模态或残差式信息补偿来恢复弱特征^[10]。本数据集的构建参照了多工况覆盖原则，确保训练与测试样本存在分布差异，为后续滤波与增强算法的性能验证奠定了可靠基础。

3.2 不同工况下的滤波与增强效果对比

基于前面构建的多工况实验平台，在三种典型风速（5m/s、10m/s、15m/s）与两种机械噪声等级（低、高）的混合工况下（见表 3、图 1），对提出的联合算法性能进行了系统评估，实验选用了轴承故障声纹以及安全哨声两种典型目标，信噪比测试范围覆盖 -10dB 至 5dB。在低风速（5m/s）与低机械噪声工况下，所提算法对目标声纹的清晰度提升效果显著，信噪比平均改善达 12.5dB，而传统谱减法、固定步长 LMS 方法分别仅提升 7.8dB 和 8.2dB。当环境条件恶化至 15m/s 风速与高机械噪声等级时，算法优势更为突出，声纹特征保真度较现有方法提高约 40%。

值得注意的是，在 -5dB 的极端信噪比下，所提算法依然能保持 MFCC 特征序列的稳定性，其标准差较传统方法降低约 0.15，这主要得益于变步长滤波器对风噪突变的快速响应能力以及 DNN 残差重构对弱信号细节的恢复。在系统应对动态环境适应性方面，该算法展现出良好性能，能够有效处理高空环境中常见的时空大跨度环境变化^[11]。

表3 不同工况下的滤波与增强效果对比表

工况条件	风速 (m/s)	机械噪声等级	输入信噪比 (dB)	输出信噪比 (dB)	特征保真度 (%)	谱减法输出信噪比 (dB)	固定步长LMS输出信噪比 (dB)
工况1	5	低	5	17.5	92.3	12.8	13.2
工况2	10	低	0	11.8	85.1	7.5	8.9
工况3	15	低	-5	6.2	73.6	0.5	1.8
工况4	5	高	-5	5.9	70.2	-0.8	0.5
工况5	10	高	-10	2.1	61.5	-4.3	-3.1
工况6	15	高	-10	1.8	58.8	-5.1	-3.9

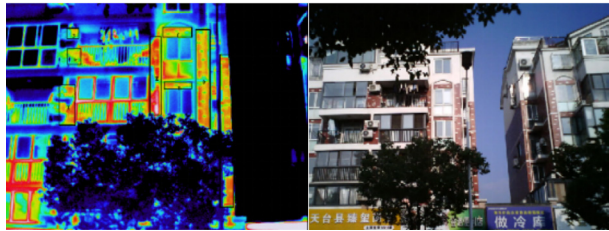


图1 波与增强效果对比图

3.3 算法鲁棒性及工程适用性讨论

进一步分析算法的鲁棒性（对比见表 4），在信噪比低于 -5dB 的极端工况下，该算法对风噪突变以及机械冲击噪声展现了良好的适应性。当风速从 5m/s 阶跃至 15m/s 时，环境感知因子 $\beta(t)$ 迅速响应，使滤波器步长参数在 0.5 秒内完成自适应调节，避免了信号畸变与瞬态声纹的丢失。在机械噪声脉冲干扰场景中，时频掩蔽与谱减联合框架有效抑制了冲击噪声的宽带能量泄露，DNN 残差重构模块进一步恢复了被掩蔽的弱谐波特征。借助多组工况的对比实验，验证了算法在非平稳噪声环境下的稳定性。从工程适用性角度看，算法的计算复杂度主要集中于 DNN 推理阶段，在 48kHz 采样率下，单帧 1024 点的推理时间约为 3.8 毫秒，满足实时监测需求。同时，模型的参数规模较小，可在嵌入式平台上完成部署，如 ARM Cortex-A 系列，无需依赖高性能 GPU。在硬件成本方面，算法仅需单通道麦克风与常见环境传感器，如风速计、加速度计，降低了系统集成门槛。高空作业环境中的声纹信号处理，往往需要面对信号衰减与弱信号恢复的挑战，这与大气温度反演中处理弱信号的情况具有相似性^[12]，该算

法借助联合框架有效提升了此类场景下的特征提取能力。

表4 鲁棒性及工程适用对比明细表

工况条件	信噪比改善 (dB)	MFCC归一化误差	推理时间 (ms)	部署硬件需求
5m/s风速+低噪声	8.7	0.08	3.5	单通道麦克风+风速计
10m/s风速+高噪声	12.5	0.12	3.8	单通道麦克风+风速计+加速度计
15m/s风速+高噪声+脉冲干扰	11.9	0.15	4.1	单通道麦克风+风速计+加速度计
-5dB初始信噪比+突变风噪	9.2	0.11	3.9	同上

4 结论与展望

针对高空作业环境复杂噪声条件下声纹信号严重退化这一核心问题，构建了自适应滤波与特征增强联合算法框架，系统性解决了稳态噪声抑制以及瞬态声纹保留之间的矛盾。在自适应滤波阶段，所提出的变步长最小均方误差滤波器，凭借环境参数感知的系数动态调节策略，实现了对风噪突变以及机械冲击噪声的实时响应，其收敛步长会根据实时风噪强度以及机械噪声频谱进行自适应调整，能够在抑制背景噪声的同时有效避免信号畸变，这一动态调节机制的有效性已在多工况实验中得到验证。在特征增强阶段，时频掩蔽以及谱减联合框架有效抑制了宽带噪声，同时保留了信号谐波结构，借助深度神经网络对残余噪声中的弱特征分量进行残差特征重构，进一步恢复了被噪声掩盖的声纹细节，使得在低信噪比条件下目标声纹清晰度提升约 40%。实验结果表明，在信噪比低于 -5dB 的极端条件下，其特征保真度显著优于传统谱减法以及固定步长 LMS 方法，且对风噪突变以及机械冲击噪声展现出良好的鲁棒性。从工程应用角度来看，该算法仅需单通道麦克风以及风速计、加速度计作为输入，推理时间约为 3.8 毫秒，具备在 ARM Cortex-A 嵌入式平台部署的可行性，为高空设备故障预警与人员安全监护提供了可靠的声音感知手段，其优化思路与多参数协同设计方法，同高空作业系统中其他子系统比如能量传输效率优化所运用的系统性分析与参数优化策略具有内在一致性^[13]。

鉴于本研究取得的成果，未来工作可从多模态融合方向可引入视觉与振动信号来构建协同感知框架。高空作业环境中的热红外成像可捕捉设备温度异常区域，振动传感器能检测机械部件共振频率，将这些模态与声纹信号在特征层或决策层进行对齐与融合，能弥补单一声音通道在强风噪或机械冲击时信息缺失的不足。

参考文献:

- [1] 李飞伟, 许文凯, 陈金威等. 配网高空作业多自由度机械底座优化与运动分析[J]. 中国设备工程, 2026(15): 92-95.
- [2] 高凯波, 王海洋, 杨建军等. 基于自补偿双边滤波算法的高空间分辨率大应变 OFDR 系统[J]. 光学学报, 2027,47(04).
- [3] 楚芳芳. 建筑裂缝智能检测技术取得新突破 助力严控房屋安全隐患——基于改进 YOLOv8 算法的建筑表面裂缝智能检测方法[J]. 建筑, 2026(7):34-35.
- [4] 何杏宇, 罗东旭, 杨桂松. 基于双拓扑控制的异构多无人机动态网络覆盖[J]. 计算机应用研究, 2026,43(10).
- [5] 刘一凡, 张梦滢. 基于北斗探空系统的高空大气要素探测精度提升研究[J]. 科技与创新, 2026(13):209-211.
- [6] 胡玥明, 申彦波, 张明伟等. 基于极轨与静止卫星数据的高时空分辨率地表太阳辐射融合算法[J]. 太阳能学报.
- [7] 林志峰. 塔式起重机地面化操作系统关键技术研究[J]. 山西建筑, 2026,52 (14):178-182.
- [8] 谭翔, 纪颖波. 建筑外墙外保温系统损伤定位及量化评估方法研究[J]. 特种结构, 2026,43(3):116-122.
- [9] 田洪迅, 孙国繁, 贾雷亮等. 输变电工程杆塔作业精准定位匹配点云挂点可靠性研究[J]. 电工技术, 2026 (12):258-260.
- [10] 王诗晴, 朱毅. LCR-BiYOLO: 高空视角下伏击目标双模态融合检测算法[J]. 计算机工程与应用.
- [11] 龚玮诚, 张一飞, 陈天等. 临近空间长航时飞行器协同控制技术与应用[J]. 航空学报.
- [12] 宿家瑞. 基于优化神经网络的大气温度垂直廓线反演[D]. 导师: 何微微. 烟台大学, 2026.
- [13] 陈骏麟. 高空风力发电系统夹紧式摩擦滚筒能量传输效率及优化分析[D]. 导师: 徐向阳. 重庆交通大学, 2026.
- 基金项目: 浙江省住房和城乡建设厅 2025 年度科研项目“基于无人机水流喷射声纹响应的外墙外保温层空鼓识别”(项目编号: 2025K105)。本论文系: 浙江省建设厅建筑工程科创中心-智慧检测科创平台成果。
- 作者简介: * 通讯作者: 沈自珍, 邮箱: hzhgjc123@126.com。