

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0094-05

智能视觉协同的小型麦克风阵列“隐声”技术

梁菲菲

(陕西工业职业技术学院 信息工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:针对智能终端普及带来的声学隐私泄露风险加剧,提出一种基于小型差分麦克风阵列的定向拾音技术,通过4步信号处理框架实现隐声功能:多通道信号经重叠分帧(5~50 ms)与短时傅里叶变换完成时频转换;在频域子带构建约束零点波束形成器,通过求解线性方程组获取最优滤波系数;对多通道频谱系数进行空域滤波,实现噪声抑制与目标信号增强;采用重叠相加法经逆变换重构时域信号。用MATLAB进行了仿真验证,以获取不同波束形成方法对不同距离上声源的响应。在试验测试方面,搭建了一套隐声麦克风阵列系统的硬件平台,设计并完成了算法处理板。最后,在全消声暗室中对面向隐私通信的差分麦克风阵列隐声技术进行了实验测试。测试结果表明,基于小型麦克风阵列实现隐声具有可行性,该技术可为移动设备提供有效的声学隐私保护方案,在智能家居、医疗录音等场景具有重要应用价值。

关键词:声学隐私;语音通信;MVDR;麦克风阵列;空域滤波;隐声技术

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-7241(2026)03-0094-05

Aoustic zooming technique based on the intelligent visual-collaborative small microphone arrays

LIANG Feifei

(School of Information Engineering, Shaanxi Polytechnic University, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: With the escalating risk of acoustic privacy leakage due to the proliferation of smart terminals, this paper proposes a directional sound pickup technology based on a compact differential microphone array. The technology achieves acoustic stealth through a four-step signal processing framework: Multi-channel signals undergo frame overlapping (5–50 ms) and short-time Fourier transform for time-frequency conversion; Constrained null-steering beamformers are constructed in frequency subbands, with optimal filter coefficients obtained by solving linear equations; Spatial filtering is performed on multi-channel spectral coefficients to suppress noise and enhance target signals; Overlap-add method is applied for inverse transformation to reconstruct time-domain signals. For theoretical validation, simulations are conducted in MATLAB to analyze the response of different beamforming methods to sound sources at varying distances. In experimental testing, a hardware platform for stealth microphone array systems is established, including the design and implementation of an algorithmic processing board. Finally, experimental tests are performed in an anechoic chamber to evaluate the stealth technology of differential microphone arrays for privacy-oriented communication. The results demonstrate the feasibility of achieving acoustic stealth with compact microphone arrays, providing an effective solution for acoustic privacy protection in mobile devices. This technology holds significant application value in scenarios such as smart homes and medical recordings.

Keywords: acoustic privacy; voice communication; MVDR; microphone array; spatial filtering; acoustic zooming

隐声技术的研究已经有了很长的历史,在声信号传感领域主要探索了两种方法,骨传导麦克风和超声麦克风,在声信号处理领域探索了信号分离技术^[1]。

骨传导麦克风是利用人讲话时引起的头颈部骨骼的轻微振动来把声音信号收集起来转为电信号。早在几百年前,早期的骨传导麦克风只能用于辅助常规的麦克风开始应用,近一二十年,骨传导麦克风开始真正受到人们关注,其性能有了大幅提高。市场上已经出现了多款基于骨传导麦克风的通信耳麦。其中,2013年5月北京美尔斯

通科技发展股份有限公司发明一种骨传导麦克风,实现了该产品自主研发国内零的突破,目前已投入市场。最近,类似于骨传导原理的其他声传感器也获得了重视,如DAIKIN-D Talk Mic耳麦。其工作原理是利用高灵敏度的麦克风拾取说话人声带振动信号,并转换成电信号。这种拾音方式同骨传导麦克风有很多类似之处。骨传导麦克风的通信耳机目前推广还不是非常理想,主要存在几个问题。1)动态效果差;2)成本高;3)封装效果差;4)音质差。十余年前,美国贝尔实验室的科学家设计了一种超声

收稿日期:2024-09-11;录用日期:2024-10-08

基金项目:陕西工业职业技术学院2024年度校级科研项目(2024YKYB-029,KCTD2024-02)

作者简介:梁菲菲(1992—),女,硕士,讲师,工程师,研究方向:信号处理,计算机应用。

引用本文:梁菲菲. 智能视觉协同的小型麦克风阵列“隐声”技术[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(3):94-98. (LIANG Feifei. Aoustic zooming technique based on the intelligent visual-collaborative small microphone arrays[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(3):94-98.)

麦克风。这种麦克风最大技术特点是工作在超声频段,因此不受听觉感知频率范围内音频信号的干扰,可用于解决类鸡尾酒会环境中的语音通信问题。这种麦克风在真正使用前还有很多问题需要解决,最大的技术问题就是对于鼻音等声道特征不突出的音素,合成的语音质量和可懂度都不高。

声技术从理论上讲可以看作是信号分离或增强问题的一个子问题。在一个复杂的声学环境中,利用麦克风来拾取来自某个声源的信号,该信号几乎无例外地会被污染。根据污染产生的机理,一般将污染分为四大类:环境噪声、回声、混响和来自其他声源的干扰信号。为了应对这四类污染源对语音通信造成的影响,人们进行了长期的研究,研发了多种不同的声学信号处理方法,包括语音降噪^[2-4]、语音增强、自适应回声对消、混响抑制、声源分离、波束形成^[5]等,其中语音降噪、声源分离和波束形成的目标都是将期望的有用信号与其他的干扰信号分开,所以这些技术都可以用于隐声处理。但目前的分离技术能取得的分离性能还很有限,无法满足隐声应用的需求。

前面提及的信号分离技术需要用到麦克风阵列(microphone array, MA)^[6]。对于麦克风阵列的研究已经有了四十多年的历史,在这四十多年里,人们已经研发出了很多阵列设计与处理方法。按照阵列对声场的响应原理,这些阵列可以分为两大类:加性阵列(additive microphone array, AMA)和差分阵列(differential microphone array, DMA)。加性阵列一般尺寸较大,每个麦克风测量的是声场的声压,整个阵列波束形成也是对声压场进行响应。目前文献中大量的工作都是关于加性阵列的,相较而言,差分阵列^[5]是对声压场的空间微分场进行响应,具有阵列尺寸小、波束图频率一致性较好、在给定阵元数目的情况下能够最大化阵列指向性等特点。

1 小型麦克风阵列隐声技术概述

基于小型麦克风阵列的“隐声”技术研究如何利用多个麦克风在智能手机上实现“隐声”。本文提出了一种设计和实现“隐声”的新方法。它通过 4 个步骤来实现。首先,差分阵列中各个麦克风接收到的信号被分割成彼此重叠的信号帧(一般为几毫秒到几十毫秒),然后利用短时傅里叶变换将这些信号帧的数据从时域转换到频域;其次,在每一个短时傅里叶变换的子带上设计一个差分波束,其中波束形成的滤波系数是通过求解由零点约束的线性方程组来获得;再次,利用设计好的差分波束形成器对多通道的短时傅里叶变换系数进行滤波,以达到在子带上消除噪声并估计期望信号的目的;最后,利用重叠相加或重叠保存的方法通过短时傅里叶反变换将估计的信号转换到时域。

图 1 给出了一个典型的阵列接收系统示意图,用于隐声技术的麦克风阵列为包含 M 个全指向性麦克风的均匀线性阵列,其中相邻两个麦克风之间的间距为 δ 。由于隐声技术用于拾取近距离声源,故假设声学环境中存在理想的

近场声源和干扰作用在该麦克风阵列上,声源距各麦克风的距离分别为 $r_{s,1}, r_{s,2}, \dots, r_{s,M}$, 将阵列的中心定义为参考点,声源距参考点的距离为 r_s , 入射角为 θ_s , 如图 1 所示。则声源距第 m 个麦克风的距离可以表示为

$$r_{s,m} = \begin{cases} \sqrt{r_s^2 - 2r_s d_m \cos \theta + d_m^2}, & m \leq \frac{M+1}{2} \\ \sqrt{r_s^2 + 2r_s d_m \cos \theta + d_m^2}, & m > \frac{M+1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d_m = \left| \frac{M+1}{2} - m \right| \delta$ 。

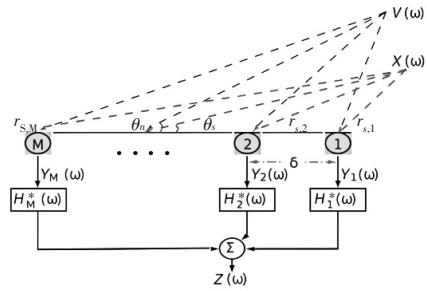


图 1 均匀线性阵列对近场声信号的拾取图

Fig. 1 Illustration of a uniformly spaced linear microphone array for sound capture in the nearfield

设在离散时间 k , 声源发出的信号为 $x(k)$, 若忽略传播过程中的吸收损耗, 则第 m 个麦克风拾取到的信号相对于声源信号仅有相位延迟, 还存在与距离成反比的幅度衰减, 可表示为

$$y_m(k) = x_m(k) + v_m(k) = \frac{1}{r_{s,m}} x(k - \tau_m) + v_m(k), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中, $x_m(k)$ 表示第 m 个麦克风拾取到的声源信号, $v_m(k)$ 表示第 m 个麦克风拾取到的噪声信号; τ_m 表示第 m 个麦克风相较于声源的时延; 由于近场理想声源的波阵面为球形, τ_m 可表示为 $\tau_m = \frac{r_{s,m}}{c}, m = 1, 2, \dots, M$, 式中 c 表示空气中的声速, 在频域中式 (2) 变为

$$Y_m(\omega) = \frac{e^{-jkr_{s,m}}}{r_{s,m}} X(\omega) + V_m(\omega), m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

式中, $k = \frac{\omega}{c}$ 表示波数, $\omega = 2\pi f$ 表示角频率; f 代表时间频率, $j = \sqrt{-1}$ 代表虚数单位, $Y_m(\omega), X_m(\omega), V_m(\omega)$ 分别表示 $y_m(k), x_m(k), v_m(k)$ 的傅里叶变换。

进一步地, 根据阵列的结构、阵元数目、声源的位置等参数, 构造长度为 M 的导向矢量为

$$d(\omega, r, \theta) = \begin{bmatrix} e^{-jkr_1} & e^{-jkr_2} & \dots & e^{-jkr_M} \end{bmatrix}^T, \text{ 上角标 T 表示向量转置运算, 令 } r = r_s, \theta = \theta_s, \text{ 那么,}$$

$$d_s(\omega, r_s, \theta_s) = \begin{bmatrix} e^{-jkr_1} & e^{-jkr_2} & \dots & e^{-jkr_M} \end{bmatrix}^T,$$

M 个麦克风拾取到的信号用向量表示为

$$\mathbf{y}(\omega) = [Y_1(\omega) \ Y_2(\omega) \ \cdots \ Y_M(\omega)]^T = \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s) X(\omega) + V(\omega) \quad (4)$$

$\mathbf{y}(\omega)$ 经过阵列处理,得到的输出信号为

$$Z(\omega) = \mathbf{h}^H(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s) X(\omega) + \mathbf{h}^H(\omega) V(\omega) \quad (5)$$

式中, $Z(\omega)$ 是声源信号 $X(\omega)$ 的估计;上标 H 表示共轭转置运算, $\mathbf{h}(\omega) = [H_1(\omega), H_2(\omega), \dots, H_M(\omega)]^T$ 表示麦克风阵列对输入信号的加权向量,也就是麦克风阵列的滤波器系数。

2 小型麦克风阵列隐声处理方案

通过前期的调研,选择最适合用于智能手机上的隐声方案:差分麦克风阵列方法^[7]。 N 阶差分麦克风阵列需要使用 $N + 1$ 个麦克风,其响应是从 0 阶到 N 阶的空间微分场的线性组合。 N 阶差分麦克风阵列的基本构成原理是利用 N 阶差分来逼近声压场的 N 阶微分,为了保证逼近的精度,阵元间距必须要小。小的阵元间距会为阵列带来很多好处,主要有:1)波束图不再是频率的函数,不随频率的变而变化,可以在很宽的频段内获得完全一致的空间响应,因此适合处理宽带声学及语音信号;2)阵列的尺寸(孔径)很小,很容易集成到像手机、蓝牙、平板电脑等小型通信设备中。这种差分波束形成通过直接约束波束图的零点的位置来设计滤波器系数。即约束端射方向上距离处的响应为 1,其他 N 个非端射方向上距离处响应为 0。

本文提出基于最小方差无畸变响应(minimum variance distortionless response, MVDR)的隐声方法。在频率为 ω 的子带上,构造基于 MVDR^[8]的隐声滤波器。方法如下。不衰减近距离声源信号同时最小化阵列输出端剩余噪声的方差就得到了 MVDR 隐声滤波器,数学表达式为

$$\mathbf{h}_{\text{MVDR}}(\omega) = \underset{\mathbf{h}(\omega)}{\text{argmin}} \mathbf{h}^H \mathbf{R}_v \mathbf{h}, \text{ subject to } \mathbf{h}^H(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s) = 1 \quad (6)$$

使用拉格朗日乘子法可以求解式(6),得

$$\mathbf{h}_{\text{MVDR}}(\omega) = \frac{\mathbf{\Gamma}_v^{-1}(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s)}{\mathbf{d}_s^H(\omega, r_s, \theta_s) \mathbf{\Gamma}_v^{-1}(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s)} \quad (7)$$

假设噪声为各向同性噪声^[9],其归一化的相关矩阵的第 (m, n) 个元素可以写成如下形式。

$$\begin{aligned} \mathbf{\Gamma}_v(\omega)_{mn} &= [\mathbf{\Gamma}_{\text{dn}}(\omega)]_{mn} = \frac{1}{4\pi} \int_{\theta, \varphi} e^{-j\omega(n-m)\tau_0 \cos \theta} \sin \theta d\theta d\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\pi e^{-j\omega(n-m)\tau_0 \cos \theta} \sin \theta d\theta = \\ &= \frac{\sin[\omega(n-m)\tau_0]}{\omega(n-m)\tau_0} = \text{sinc}[\omega(n-m)\tau_0] \quad (8) \end{aligned}$$

式中, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$, 有两种极端的情况。1) 如果 $\omega\tau_0$ 非常大,即在高频或者大间距情况下,两个传感器接收到的噪声信号接近不相关,各向同性噪声接近空间白噪声;

2) 如果 $\omega\tau_0$ 非常小,即在低频或者小间距情况下,两个传感器接收到的噪声信号就接近相干,各向同性噪声接

近点源噪声。

基于 MVDR 的隐声滤波器有一个矩阵求逆的运算,当麦克风阵元数目较多时,矩阵会出现病态,滤波器会出现极为不稳定的情况,为了避免求逆不稳定情况的发生,采用传统的做法:对角加载技术^[10],将上述矩阵与一对角矩阵相加,对角加载后的矩阵可以表示为 $[\mathbf{\Gamma}_{\text{dn}}(\omega) + \varepsilon \mathbf{I}]$,其中 \mathbf{I} 为大小为 M 的单位矩阵, ε 为加载系数,此时基于 MVDR 的隐声滤波器系数为

$$\mathbf{h}_{\text{MVDR}}(\omega) = \frac{[\mathbf{\Gamma}_{\text{dn}}(\omega) + \varepsilon \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s)}{\mathbf{d}_s^H(\omega, r_s, \theta_s) [\mathbf{\Gamma}_{\text{dn}}(\omega) + \varepsilon \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s)} \quad (9)$$

3 小型麦克风阵列隐声效果分析

为了测试隐声性能,理论部分通过在 Matlab 中进行了仿真,获得不同波束形成方法对不同距离上声源的响应。为了进一步验证方案的可行性,构建面向语音通信与交互的小型麦克风阵列隐声方法的硬件平台,设计完成算法处理板,在全消声暗室中实验测试面向语音通信与交互的小型麦克风阵列隐声技术。

3.1 算法仿真

阵列输出中与声源信号有关的成分为 $\mathbf{h}^H(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s) X(\omega)$ 。因此,阵列对声源信号的响应为 $H(\omega, r_s, \theta_s) = \mathbf{h}^H(\omega) \mathbf{d}_s(\omega, r_s, \theta_s)$ 。阵列对声源信号的响应有 3 个变量 ω, r_s, θ_s 。固定其中两个变量,阵列对声源信号的响应随另一个变量变化而产生了 3 个指标。1) 固定 ω, θ_s , 阵列对声源信号的响应随 r_s 变化的指标称为隐声衰减函数,隐声衰减函数描述的是阵列对单频声源信号在不同距离处的增益;2) 固定 r_s, θ_s , 阵列对声源信号的响应随 ω 变化的指标称为隐声频率响应函数,隐声频率响应函数描述的是阵列对宽带信号的增益;3) 固定 ω, r_s , 阵列对声源信号的响应随 θ_s 变化的指标称为波束图,波束图描述的是阵列对不同方向入射信号的敏感度。通过对这 3 个指标进行 MATLAB 理论仿真,验证隐声滤波器对干扰的隐声效果。麦克风阵列结构为均匀线性阵列,麦克风数目 $M = 8$, 阵元间距 $\delta = 1.1 \text{ cm}$, 声源位置: $\theta_s = 0^\circ, r_s = 5 \text{ cm}$ 。

图 2 为基于 8 阵元 MVDR 的隐声方法的隐声衰减曲线图。可以看出,点源信号在 20 cm 以内衰减很快,且距离越近衰减越快;大于 20 cm,衰减量几乎与距离成反比。说明当声源距离不大于 20 cm 时,基于 8 阵元 MVDR 的隐声方法可以隐声远距离干扰。说明,隐声半径 $r_0 \approx 20 \text{ cm}$, 当声源距离 $r_s < r_0$ 时,基于 8 阵元 MVDR 的隐声方法可以隐声 r_0 外的干扰。

图 3 为基于 8 阵元 MVDR 的隐声方法的隐声频率响应曲线图。可以看出,2 000 Hz 的点源信号在 5 cm、10 cm、30 cm、50 cm 处的响应依次约为 0 dB、19 dB、33 dB、38 dB。说明:声源距离为 5 cm 时,基于 8 阵元 MVDR 的隐声方法可以隐声端射方向 10 cm、30 cm、50 cm 的干扰。

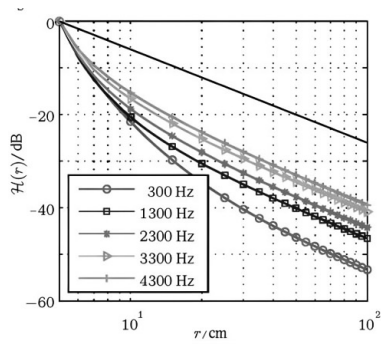


图2 隐声衰减曲线(无标记实线为点源声场的自然衰减曲线)

Fig. 2 Decay curves (the unmarked solid line indicates the natural attenuation of a point source)

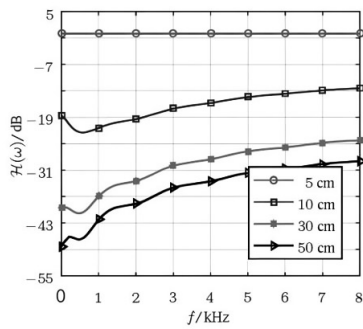


图3 隐声频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response curves

图4为频率为1300 Hz、3300 Hz的基于8阵元MVDR的隐声方法的波束图。可以看出:在不同频率上,声源距离为5 cm时,基于8阵元MVDR的隐声方法可以隐声任意方向10 cm、30 cm、50 cm处的干扰,对非端射方向的干扰的隐声效果更好。

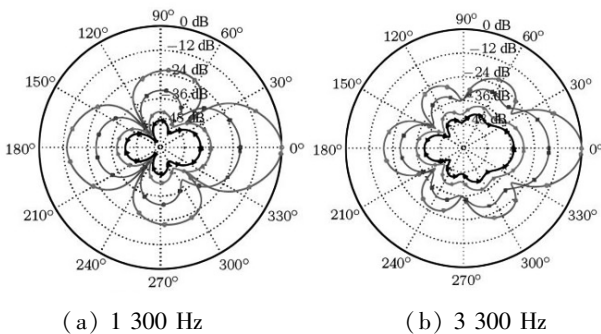


图4 波束图

Fig. 4 Beam patterns

3.2 算法测试

为了进一步验证方案的可行性,在完成了仿真以后,设计完成了一个8个麦克风组成的均匀线形阵列用于实际测试基于差分阵列的隐声技术。考虑到这个实验平台需要有一定的灵活性,既要能够验证不同阶数的差分阵列,又要能够验证不同的波束形成方法,而且能够克服差分阵列中的自噪声放大问题,选择设计一个由8个阵元组成的均匀线性麦克风阵列,其原理图如图5所示。阵元选择为无指向性的麦克风,阵元中心间的间距为11 mm,麦

克风的声孔同向布置。每个麦克风的信号经过放大后,由8路的多通道AD转换器将音频信号转换为数字信号(24位)。为了配合麦克风阵列的后续处理,还设计一款DSP板,处理器TMS320C6726浮点DSP处理芯片,将算法抑制到DSP芯片之中。

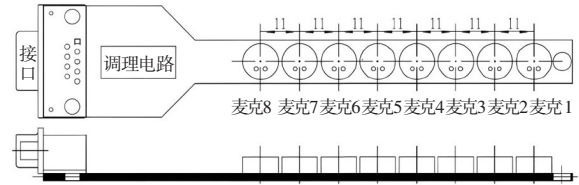


图5 由8个麦克风组成的均匀线性阵列结构图

Fig. 5 Uniform linear array structure diagram composed of 8 microphones

实验选择在全消声暗室进行。实验条件设置如下。麦克风阵列结构为均匀线性阵列,麦克风数目 $M=8$,阵元间距 $\delta=1.1$ cm,声源位置: $\theta_s=0^\circ$, $r_s=5$ cm。声源信号为录制的一段女声,干扰信号选取语音干扰、高斯白噪声干扰、线性调频干扰、3100 Hz的单频干扰4种。

实验部分均保证播放声源的扬声器位于差分阵列的端射方向。实验部分的测试工作。1)播放单频信号(频率范围为300~4500 Hz),并在不同距离采集信号,分析滤波后不同频率的信号响应来验证隐声技术的理论部分;2)播放语音信号,并在不同距离采集信号,分析滤波后的信号响应来验证隐声技术对语音信号的响应程度;3)在另一位置放置干扰源,播放声源和干扰源,分析滤波后的带噪信号的信干比。

图6为基于8阵元MVDR的隐声方法对端射方向0 cm的声源和端射方向的干扰的信干比图。可以看出,当干扰在50 cm处,图6(a)中语音干扰的信干比提升了约10 dB,图6(b)中对高斯白噪声干扰的信干比提升了约6 dB,图6(c)中对线性调频干扰的信干比提升了约7 dB,图6(d)中对单频干扰的信干比提升了约7 dB。说明,基于8阵元MVDR的隐声方法有很好的隐声效果。

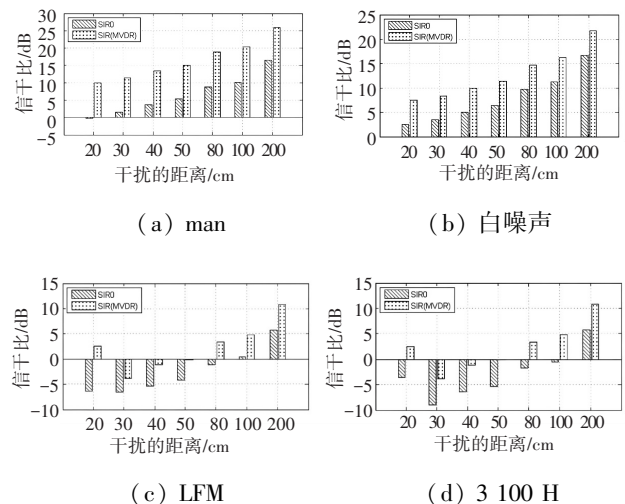


图6 信干比图

Fig. 6 Signal-to-interference ratio Diagram

4 结论

基于小型麦克风阵列“隐声”技术可以实现高保真声信号的拾取,提取一定距离区域内说话人的语音,将其与区域外的声信号分离开来,实现“隐声”,在提高通信语音质量的同时,保护说话人的隐私。该技术不仅可以用于语音通信,还可以用于智能家居、机器人、监控、游戏、虚拟现实等一系列应用中。相关研究具有很高的理论与实用价值。本文利用小型麦克风阵列来实现隐声,也就是设计隐声滤波器 $h(\omega, r, \theta)$,使得来自隐声距离以内声源的声信号无衰减通过隐声滤波器。通过仿真和实验测试,分析了隐声衰减函数、隐声频率响应函数、波束图和信干比性能指标,证实了隐声方法的可行性。

参考文献

- [1] KITAMURA D, ONO N, SAWADA H, et al. Determined blind source separation unifying independent vector analysis and nonnegative matrix factorization [J]. IEEE/ACM Trans Audio, Speech, Lang Process, 2016, 24(9):1626-1641.
- [2] 孔德廷. 一种改进的基于对数谱估计的语音增强算法[J]. 声学技术, 2020, 39(2): 208-213.
- [3] 张芳胜, 王妙龄, 季嘉辉, 等. 基于语音识别的多资源组合应急调度指挥系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3): 155-159.
- [4] 任宇路, 刘毅敏, 节连彬, 等. 基于智能视觉的变电站内人员异常行为辅助监控系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 66-70, 107.
- [5] PAN C. Study of microphone array beamforming for speech communication [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [6] BRANDSTEN M, DARREN W. Microphone arrays: signal processing techniques and applications [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] ZHAO X, BENESTY J, CHEN J, et al. Differential beamforming from the beampattern factorization perspective [J]. IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2021, 29: 632-643.
- [8] PAN C, CHEN J, BENESTY J. Performance study of the MVDR beamformer as a function of the source incidence angle [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Process, 2014, 22(1): 67-79.
- [9] BENESTY J. Springer handbook of speech processing [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [10] ZHANG H, CHEN J, BENESTY J. Study of nonuniform linear differential microphone arrays with the minimum-norm filter [J]. Applied Acousti, 2015(98): 62-69.
- (上接第40页)
- 凑,满足农户、合作社、食用菌种植企业进行批量接种生产的需求,在推广与应用方面极具价值。虽然本研究设计的接种机,在试验中取得了较好的效果,但仍有些方面可以改进,如目前该机器的使用需要人工放置菌包筐,未来可以研发更加智能的控制系统,使得接种工序与其他工序进行衔接,真正实现生产线式智能化接种。
- ## 参考文献
- [1] 鲍大鹏, 邹根, 裴晓东, 等. 中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 103-110.
- [2] 赵春艳. 云南省食用菌种业发展现状、问题和对策建议[J]. 中国种业, 2025(2): 33-37, 41.
- [3] 董浩然, 于海龙, 姜宁, 等. 中国食用菌工厂化生产发展现状及趋势[J]. 食药菌, 2024, 32(1): 1-9.
- [4] 陈长卿, 郑涛, 刘丹, 等. 食用菌袋栽液体接种机研发[J]. 农业工程, 2022, 12(9): 15-18.
- [5] 耿波, 张秀娟, 张海娟, 等. 淄博市食用菌产业现状及发展建议[J]. 北方园艺, 2025(3): 135-140.
- [6] 钟章飞, 孔维宾, 陈松. 基于西门子 PLC 电镀控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(12): 26-29, 119.
- [7] 徐名汉, 黄允魁, 陈月锋, 等. 袋栽食用菌液体菌种接种装备研发与试验研究[J]. 农业工程, 2023, 13(11): 85-92.
- [8] 齐亚聪, 陈毅飞, 杨会民, 等. 基于 PLC 的变量喷雾系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(11): 162-168.
- [9] 郭嘉, 冯杰, 刘艳芳, 等. 灵芝液体菌种制备的关键技术及规模化生产[C]//第十二届药用真菌学术研讨会论文集. 上海:中国食用菌协会, 中国食用菌协会药用真菌委员会, 2023: 1.
- [10] 吴小春. PLC 在全自动木耳菌棒接种机控制系统中的应用[J]. 南方农机, 2019, 50(18): 58-59.
- [11] 张晔, 徐名汉, 景全荣, 等. 袋栽食用菌液体菌种接种机智能控制系统设计[J]. 农业工程, 2021, 11(5): 45-49.
- [12] 汪甜, 李晓明. 智能生产线数据监控系统的研究[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(6): 27-29.
- [13] 周鑫, 胡迎春, 胡裔志, 等. 基于 PLC 的新型桑叶采摘机自动控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 6-10, 56.
- [14] 高健. 基于 PLC 的免耕播种施肥控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(10): 252-258.
- [15] 吴政. 智能精密播种机的优化设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 114-119.
- [16] 张继伟. 基于 PLC 与组态技术的电气设备异常运行状态检测方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(1): 214-217.
- [17] 景全荣, 徐名汉, 刘天舒, 等. 袋栽食用菌生产关键装备现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2020, 10(4): 11-15.
- [18] 韩莅莉, 王婷, 辛天舒. 基于物联网技术的医院楼宇智能控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6): 103-106.
- [19] 周鑫, 胡迎春, 胡裔志, 等. 基于 PLC 的新型桑叶采摘机自动控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 6-10, 56.
- [20] 黄晨阳, 陈强, 赵梦然. 中国食用菌工厂化生产现状与问题分析[J]. 农业工程技术, 2021, 41(10): 12-14.