

# 一种广义旁瓣抵消器结构的语音增强改进算法

李 斌<sup>1</sup> 张玲华<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003; 2. 江苏省通信与网络技术工程研究中心, 南京, 210003)

**摘要:** 当广义旁瓣抵消器 (Generalized sidelobe canceller, GSC) 结构的语音增强算法对语音信号的入射方向角估计不准确时, 阻塞矩阵 (Blocking matrix, BM) 不能完全阻塞目标语音, 使得部分语音通过阻塞矩阵, 在后期多输入抵消器 (Multiple-input canceller, MC) 模块中和参考信号相抵消, 造成目标语音的损失。针对广义旁瓣抵消器因信号到达方向 (Direction of arrival, DOA) 估计误差而导致语音泄漏的问题, 本文提出了一种麦克风阵列语音增强的优化算法, 先对经过时延补偿的信号进行频谱调整, 再利用 MC 模块输出与 BM 模块输出存在相关性的特点, 对阻塞矩阵进行自适应调整, 使方向估计参数更趋近于真实目标语音方向, 以减少阻塞矩阵中目标语音的泄漏。仿真结果表明, 该算法可以有效减少阻塞矩阵中目标语音的泄漏、增强系统的鲁棒性以及提高语音增强效果。

**关键词:** 广义旁瓣抵消器; 自适应算法; 语音增强; 麦克风阵列

**中图分类号:** TN912.3      **文献标志码:** A

## Improved Speech Enhancement Algorithm with Generalized Sidelobe Canceller

Li Bin<sup>1</sup>, Zhang Linghua<sup>2</sup>

(1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China; 2. Jiangsu Communication and Network Technology Engineering Research Center, Nanjing, 210003, China)

**Abstract:** In speech enhancement algorithm based on generalized sidelobe canceller (GSC), when there is an error in direction estimating, the target speech cannot be blocked by blocking matrix (BM) module completely. Then in the multiple-input canceller (MC) module, the target speech will be eliminated, which will cause the leakage of the target speech. In this paper, a new optimization algorithm is proposed for the leakage of the speech caused by the error of signal direction of arrival (DOA). First, we adjust the spectrum of the signal with time delay compensation, then the blocking matrix would be adjusted adaptively according to the characteristics of the correlation between the final output of MC module and the output of BM module. The estimated direction can be closer to the real target speech direction in order to reduce the leakage of the target speech. Simulation results show that the proposed algorithm has better speech enhancement performances in both objective and subjective evaluations.

**Key words:** generalized sidelobe canceller; adaptive algorithm; speech enhancement; microphone array

## 引言

在数字助听器以及其他声学器件中,由于周围环境本身存在的干扰和电子器件工作时造成的影响,导致麦克风接收到的信号都是混有噪声的混合信号。要想恢复出需要的纯净语音,就需要语音增强算法对混合信号进行去噪处理。传统的语音增强算法都为单通道算法,典型的算法有谱减法、小波阈值去噪算法、自适应消除法以及信号子空间法等。但是单麦克风的降噪效果有限,且方向性不全。受到天线阵列的启发,近年来提出将单麦克风语音算法集成于阵列中,麦克风阵列算法越来越多地应用在语音增强中<sup>[1]</sup>。Griffiths 等<sup>[2]</sup>在 1982 年首次提出了广义旁瓣抵消器(Generalized sidelobe canceller, GSC)的概念。广义旁瓣抵消器结构的波束形成算法具有高性能和较低的计算量,在数字助听器中得以广泛应用<sup>[3]</sup>。这种波束形成器基于自适应噪声抵消原理,将混合语音信号引入上下两个支路,上支路通过固定波束形成器(Fixed beamformer, FBF)按照约束条件进行滤波,下支路中加入阻塞矩阵(Blocking matrix, BM)结构,仅阻塞期望方向的信号,并运用无约束的自适应算法使得输出信号的能量最小,最终实现无约束的自适应波束形成。然而在实际应用中,由于声学器件本身体积很小,麦克风阵列微小的距离误差就会导致语音信号处理结果出现失真,再加上无法精确地估计目标语音的输入方向,BM 不能完全阻塞目标语音,使得部分语音通过阻塞矩阵,从而造成在后期多输入抵消器(Multiple-input canceller, MC)模块中参考语音信号和 BM 模块泄漏的目标语音抵消,造成目标语音的损失<sup>[4]</sup>。许多专家学者对其提出了改进。为了改进 GSC 算法对方向误差敏感的问题, Hoshuyama 提出在 BM 模块和 MC 模块中均引入自适应滤波器<sup>[5]</sup>。Mahnoudi 和 Drygajlo 提出在 MC 模块加入前置滤波器来减少语音的泄露<sup>[6]</sup>。还有学者提出使用一种简化的单约束波束形成方法<sup>[7]</sup>。最近有学者提出在 BM 模块和 MC 模块之间加入自适应滤波器来减少语音泄露<sup>[8]</sup>。但是这些方法都难以去除 MC 模块的输出和 BM 模块输出之间的相关性。结合前人的工作,在深入研究 GSC 算法原理的基础上,本文提出了一种改进算法。为了保护共振峰,首先对加权波束进行频谱调整,对共振峰位置以外的频率点进行初步的噪声抑制,再利用 MC 模块泄露的语音与参考语音信号之间存在相关性的特点,对 BM 的方向参数进行自适应调整,使方向参数趋近于目标语音输入方向,以减少阻塞矩阵中目标语音的泄露,从而增强系统的鲁棒性,提高语音增强的效果。

## 1 GSC 结构的波束形成算法

### 1.1 传统 GSC 算法

GSC 算法分为两个模块<sup>[9]</sup>,分别将输入信号引入上下两个通道:上通道是约束模块,起参考信号的作用,下通道是最小化模块。在上通道中,利用一个固定波束形成器按照约束条件来对接收到的信号加权求和。下通道中应用了一个阻塞矩阵,目的是将目标方向上的信号全部置为零,只保留非入射方向上的信号。图 1 为 GSC 结构的经典模型框图。其结构主要包括 3 个部分<sup>[10]</sup>: FBF, BM 和 MC。

假设各组接收的语音信号为  $x_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, M$ , 各组接收的信号间存在相对时延  $\tau_i$ ,  $M$  为麦克风的数量,那么  $x_i(t)$  满足

$$x_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t) \quad (1)$$

式中:  $s(t)$  和  $n_i(t)$  分别为目标语音与各组信号中混

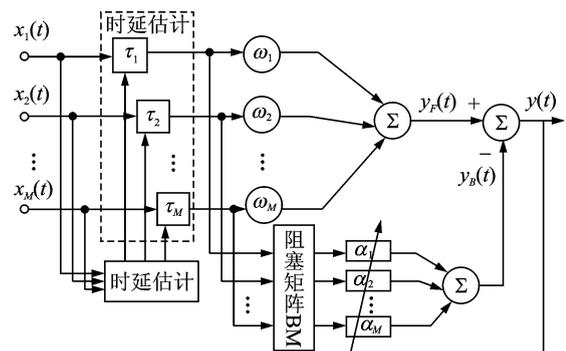


图 1 GSC 结构的波束形成算法结构图

Fig. 1 Structure of GSC

杂的干扰噪声。

GSC算法的主要原理是:首先对接收到的各组语音信号进行时延估计和时延补偿,将对齐的信号送入上下两个支路进行处理。上支路的信号通过 FBF 模块进行约束滤波,得到参考信号  $y_F(t)$ ,即

$$y_F(t) = \mathbf{W}^T \mathbf{X}(t) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$  为权向量,  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t + \hat{\tau}_1), x_2(t + \hat{\tau}_2), \dots, x_M(t + \hat{\tau}_M)]^T$  为经过时延补偿后的信号向量,可以看出,在参考信号  $y_F(t)$  中既含有目标语音信号又包括干扰噪声信号。

下支路的信号通过 BM 模块, BM 模块是一个  $(M-1) \times M$  行的满秩阻塞矩阵  $\mathbf{B}_0$ ,旨在将目标方向上的入射信号全部置零。当且仅当矩阵满足  $\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{X}(\theta_0) = 0$  时,期望信号才得以被完全滤除,则此时 BM 模块的输出  $\mathbf{X}_0(t)$  中将只含有干扰噪声,即

$$\mathbf{X}_0(t) = \mathbf{B}_0 \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

由于上、下支路的输入信号相同,则其所包含的干扰噪声是相关的,在 MC 模块可通过维纳滤波器将上下支路的输出信号进行自适应对消,那么参考信号  $y_F(t)$  中所包含的目标语音信号就可以被保留下来,而干扰噪声就可以和  $\mathbf{X}_0(t)$  自适应消除掉。

通过分析不难发现,阻塞矩阵在整个 GSC 结构中  $\mathbf{B}_0$  的作用非常重要。为了能够完全阻塞期望信号,  $\mathbf{B}_0$  的设计需要满足同一行元素之和为零的条件,即

$$\mathbf{b}_m \cdot [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T = 0 \quad (4)$$

其中  $\mathbf{b}_m$  为  $\mathbf{B}_0$  中第  $m$  行元素向量。这说明构成  $\mathbf{X}_0(t)$  的线性元素中至少有两个是相关的,那么麦克风阵列的阵元数目一定要大于噪声源的数目。文献[2]中给出的 BM 形式为

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} -1 & e^{-j\lambda \frac{d}{c} \sin(\theta)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & e^{-j\lambda \frac{d}{c} \sin(\theta)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & e^{-j\lambda \frac{d}{c} \sin(\theta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & e^{-j\lambda \frac{d}{c} \sin(\theta)} \end{bmatrix}_{(M-1) \times M} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  和  $d$  分别表示语音信号的波长以及麦克风阵列中相邻麦克风之间的距离,  $\theta$  为估计得到的目标语音信号入射角,由 FBF 模块估计得到的时延值以及麦克风阵列中麦克风间的间距求得。

## 1.2 传统 GSC 算法缺陷

实际声场中存在着混响以及其他相干噪声的干扰,而且对于麦克风阵列来说,很难做到标准的等距排列,麦克风微小的误差就会导致语音信号处理结果的不准确,很难精确地估计声源位置,声源位置的估计误差就会导致目标语音通过 BM,从而造成语音泄露。而这些泄露语音在 MC 模块与参考信号中的目标语音相互消除就会导致最终输出语音的失真,降低语音增强的效果。假设原始语音信号和干扰噪声分别从  $0^\circ$  和  $30^\circ$  方向进行入射。在语音信号方向估计误差为  $3^\circ$  的情况下,使用 GSC 结构语音增强算法对信号进行处理,结果如图 2 所示。由图 2(d) 可很明显地看出,当方向估计出现了  $3^\circ$  的误差时,经过 GSC 结构算法处理的输出语音信号与原始语音有了较大的差异,泄露的信号在波形上近似可以看出原始语音信号的轮廓。由此可以看出,泄露的语音信号和原始语音信号存在着一定的相关性,方向误差对泄露信号的影响很大,当方向估计不准确时, GSC 算法处理得到的结果会出现失真,影响增强信号的效果。

## 2 改进的 GSC 结构波束形成算法

本文提出的改进算法主要可以分为两个模块:频谱调整和 BM 的参数自适应调整,其流程图如图 3 所示。

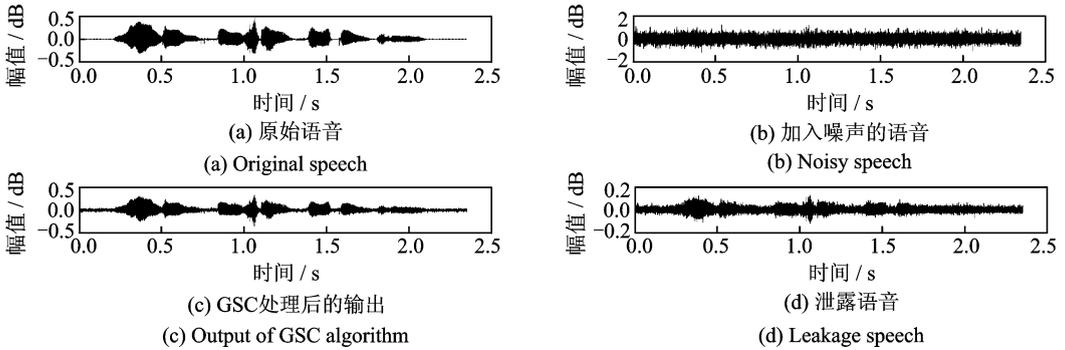


图 2 方向误差为 3° 时 GSC 结构语音增强算法仿真结果

Fig. 2 Simulation results of speech enhancement using GSC with a deflection error of 3°

### 2.1 频谱调整

此模块的主要作用是保护共振峰,并初步对加性噪声进行抑制。主要是对经过时延补偿后的信号  $x(t)$  作频谱调整,首先对合成语音信号作预处理,加窗分帧后进行语音活动性检测(Voice activity detection, VAD),旨在区分语音信号帧和噪声信号帧。然后进行傅氏变换,并提取共振峰位置,对共振峰以外的每一帧信号的频谱分别进行处理,如果是噪声帧,对信号幅度进行相应的衰减抑制;如果是语音信号帧,则根据其所在频段进行不同增益的增强。衰减和增强规则如下:

假设第  $m$  帧信号第  $k$  频率点处的频谱幅度为  $A_m(k)$ ,归一化处理后的频谱幅度记作  $\bar{A}_m(k)$ 。对该帧信号进行活动性检测,如果该帧是语音信号帧,记作  $VAD=1$ ,而如果是噪声帧,记作  $VAD=0$ 。分别对不同的信号帧进行频谱增益调整,频谱增益  $G_m(k)$  的计算方式为

$$G_m(k) = \begin{cases} \alpha^{1-\bar{A}_m(k)} & \text{第 } m \text{ 帧 } VAD=1 \\ \beta^{\bar{A}_m(k)-1} & \text{第 } m \text{ 帧 } VAD=0 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  为增益调节因子。可以人为地调整  $\alpha, \beta$  的取值来获取更好的处理效果,对于语音帧可以通过增大  $\alpha$  来适当增大增益,而对于噪声帧则可以通过减小  $\beta$  来适当削减噪声部分的增益,然后将得到的各帧语音信号的增益乘上原语音信号的频谱得到  $x_0(k) = G_m(k) \cdot A_m(k)$ ,并进行傅氏反变换得到重构的语音信号。

### 2.2 阻塞矩阵参数自适应调整

根据前文分析,可以知道,语音泄露很大一部分的原因是由于方向参数的估计误差。若 GSC 结构算法中不存在方向误差,那么经过 MC 模块处理后的输出信号中应当仅包含目标语音信号,而经过 BM 模块处理后的输出信号则仅包含干扰信号。按照 GSC 算法的前提,这两者是不相关的,两者的互相关函数也应趋于平稳。所以本文提出的改进算法根据 MC 模块的输出信号与 BM 模块的输出信号间的相关性,对 BM 中的目标语音信号方向参数  $\theta$  进行自适应调整,使其更接近真实值,以减小目标语音的泄露,增强系统鲁棒性。

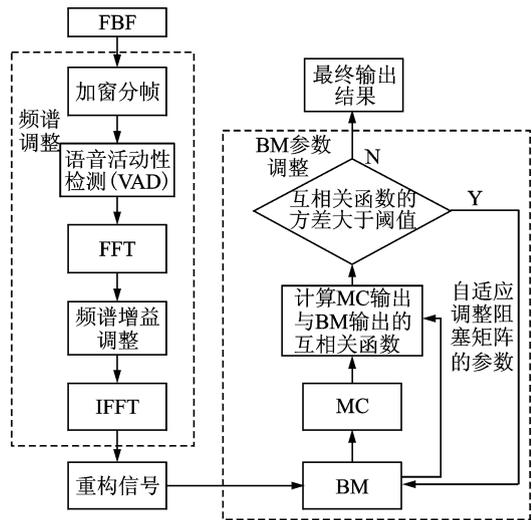


图 3 改进 GSC 结构算法流程图

Fig. 3 Process of the proposed GSC algorithm

把经过频谱调整后的重构语音信号记为  $x_0(t)$ , 其通过 BM 处理后, 输出信号为  $x_1(t)$ ,  $x_1(t)$  再经过 MC 模块的处理, 得到最终的输出信号  $y(t)$ 。本文提出的改进算法需要计算  $x_1(t)$  和  $y(t)$  两个信号之间的互相关函数  $R_{x_1y}(m)$ , 即

$$R_{x_1y}(m) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} x_1(t)y(t+m) \quad (7)$$

在理想的状态下, 应该趋于平稳, 取值始终在均值附近徘徊, 不出现较大的波动<sup>[11]</sup>, 就是说经过 BM 和 MC 模块处理得到的两个信号之间不存在相关性关系, 这种情况下,  $R_{x_1y}(m)$  的方差应该很小。但是在实际情况下, 由于 BM 中方向参数的估计误差导致了 BM 模块和 MC 模块的输出信号之间存在相关性, 因此  $R_{x_1y}(m)$  将会出现较大起伏, 波形不再平稳。求取互相关函数的方差  $Var$ , 对其设定一个阈值, 作为是否启动调整阻塞矩阵参数  $\theta$  的依据。若求得的方差小于阈值, 那么说明方向误差对最终结果的影响不大, 不需要对参数  $\theta$  做出调整, 对 MC 模块的输出信号作为最终输出; 若方差大于阈值, 则说明需要调整 BM 参数  $\theta$ , 调整的具体规则为: 以 GSC 算法中时延估计得到的目标语音方向  $\theta_0$  为初值, 设定初始调整步长  $\mu_0$ , 以使互相关函数值的方差减少的方向为目标调整方向, 按照以下法则进行迭代, 即有

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \mu_n \quad (8)$$

$$\mu_{n+1} = -\text{sgn}(\text{Var}_n - \text{Var}_{n-1}) \cdot \mathbf{X} \frac{1}{2} \mu_n \quad (9)$$

得到修正参数  $\theta_n$  后, 利用式(3)重新计算得到 BM 模块的输出  $x_n(t)$  以及 MC 模块的输出  $y_n(t)$ , 利用式(7)计算互相关函数  $R_{x_ny_n}(m)$ , 若  $R_{x_ny_n}(m)$  的方差  $\text{Var}_n$  小于阈值, 则停止迭代。得到最终参数  $\theta_{\text{opt}}$ ,  $\theta_{\text{opt}}$  也更接近实际的目标语音方向。在调整参数的过程中, 阈值和调整步长的设置会影响方向估计的准确程度和计算量大小。阈值取得越小, 步长越小, 方向估计越准确, 随之迭代次数会增加, 计算量加大。在实际应用中, 可根据实际情况选取适当的阈值和调整步长。通常情况下, 阈值选取视初始方差的大小决定, 本文选取初始方差的 25% 作为阈值。

### 3 改进算法的性能仿真

在图 2 中使用的纯净语音信号中加上方向性为  $30^\circ$  的白噪声, 使信号与方向性噪声之间的信噪比为 3dB, 语音信号方向估计误差为  $3^\circ$ , 然后按照式(7)分别计算 BM 模块与 MC 模块输出信号之间的互相关函数, 结果如图 4 所示。

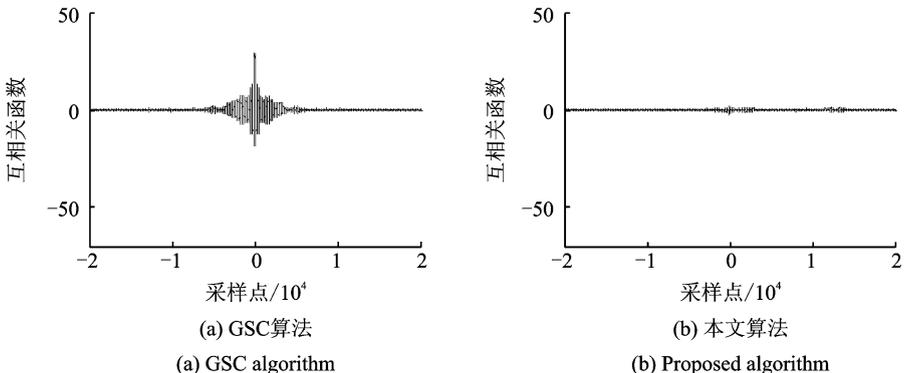


图 4 BM 模块输出信号与 MC 模块输出信号间的互相关函数

Fig. 4 Correlation between the output signal of BM module and MC module

图 4(a) 是原始 GSC 算法的互相关函数, 图 4(b) 是改进算法的互相关函数。图 4(a) 的互相关函数并不平稳, 存在明显的波动, 而图 4(b) 相比之下平缓许多, 整体趋于均值, 说明所提出的算法能够有效

地去去除 BM 模块的输出信号与 MC 输出信号之间的相关性。为了检验本文提出的算法的语音增强效果,分别采用客观和主观评价方法对算法的性能进行比较。采用一段 16 kHz 采样且伴有较少静音段的语音信号作为声源信号,采用 8 个阵元的均匀线性麦克风阵列,假设原始语音信号和干扰噪声分别从  $0^\circ$  和  $30^\circ$  方向入射,输入信号的入射角方向估计误差为  $3^\circ$ 。在频谱调整阶段,参数取值为  $\alpha = \beta = 1$ ,在阻塞矩阵参数调整阶段,调整步长初始值  $\mu_0$  取 0.1,互相关函数方差的阈值取值为 0.2。分别采用传统 GSC 结构算法、文献[8]中的算法和本文提出的算法对混合信号进行处理。处理结果如图 5 所示。

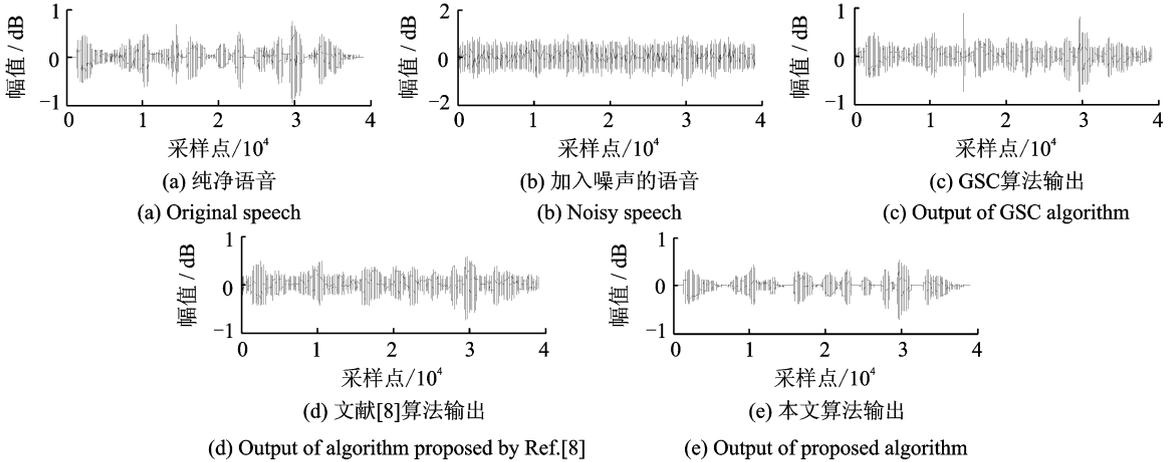


图 5 3 种算法去噪效果对比

Fig. 5 Comparison results of speech enhancement for three algorithms

图 5 中,图 5(a)是一段纯净语音信号,图 5(b)是加入噪声后的混合信号,图 5(c),(d)和(e)分别为传统 GSC 算法、文献[8]提出的算法和本文算法对混合信号进行处理后得到的结果。由图 5 可见,采用本文算法处理得到的结果在波形的视觉效果上相比两种传统算法有所提升。为了更加客观地对比 3 种算法的去噪能力,分别计算输出信号的信噪比和均方误差,其中,均方误差的计算方法为<sup>[12]</sup> $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - \hat{s}(i))^2$ ,其中  $s(i)$  和  $\hat{s}(i)$  分别表示纯净语音和去噪处理后的输出语音信号。计算结果如表 1 所示。可以发现,本文提出的算法和其他两种算法相比,输出信噪比和输出均方误差都有所提升。除了用输出信噪比和均方误差来对语音增强效果作客观评价外,本文还进行了 MOS 分主观听音测试来对 3 种算法的输出语音可懂度进行评价。在主观评价的实验中,邀请 3 位听觉正常的测试者来参加测试。改变加入的方向性噪声的强度,使信号与方向性噪声之间的信噪比分别为 0,3 和 5 dB,受邀测试者分别听取 3 种情况下经过 3 种算法增强后的语音信号,每段语音听两次后分别给出评分。对 3 位测试者的评分求平均作为测试结果,见表 2。表 2 的 MOS 测试结果表明,在不同的信噪比情况下,改进算法得到的评分均高于传统 GSC 算法;在信噪比较低的情况下性能优于文献[8]算法。这充分说明改进算法处理的信号可懂度和清晰度更高,本文算法获得了更好的语音增强效果。

表 1 输出信号的信噪比和均方误差比较

Tab. 1 Output SNR and mean square error

| 测定指标   | 传统 GSC 算法 | 文献[8] 算法 | 本文算法    |
|--------|-----------|----------|---------|
| SNR/dB | 7.832     | 9.894    | 11.653  |
| MSE    | 0.359 8   | 0.356 2  | 0.265 7 |

表 2 MOS 测试评分

Tab. 2 MOS test result

| 信噪比/<br>dB | 传统 GSC<br>评分 | 文献[8]<br>算法评分 | 本文算法<br>评分 |
|------------|--------------|---------------|------------|
| 0          | 2.7          | 3.3           | 3.5        |
| 3          | 2.9          | 3.7           | 3.8        |
| 5          | 3.1          | 3.8           | 3.9        |

## 4 结束语

本文研究了基于广义旁瓣抵消器结构的语音增强算法,针对由于目标语音方向估计不准确,不可避免地造成语音泄露的问题,在研究 GSC 结构波束形成算法原理的基础上,提出了相应的改进算法。由于目标语音方向估计不准确时,泄露语音与参考信号之间会存在相关性。出于对共振峰的保护,首先对频谱进行初步调整,再对 BM 模块和 MC 模块的输出信号之间互相关值的方差设定阈值,重新调整目标语音方向估计参数,使目标语音方向的估计误差减小,从而减少语音信号的泄露。仿真实验结果表明,所提出的改进算法有效地减少了阻塞矩阵中目标语音的泄漏,增强了系统的鲁棒性,提高了语音增强的效果,相比于其他算法具有较明显的效果提升。

### 参考文献:

- [1] 赵力,张昕然,梁瑞宇,等. 数字助听器若干关键算法研究现状综述[J]. 数据采集与处理, 2015(2):252-265.  
Zhao Li, Zhang Xinran, Liang Ruiyu, et al. Review on certain key algorithms of digital hearing aids[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015(2):252-265.
- [2] Griffiths L J, Jim C W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beam forming [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 30(1): 27-34.
- [3] 邹采荣,梁瑞宇,谢跃. 数字助听器语音处理算法研究进展与展望[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(2):242-251.  
Zou Cairong, Liang Ruiyu, Xie Yue. Research progress and outlook of speech processing algorithms for digital hearing aids [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(2):242-251.
- [4] Kim S M, Hong K K. Hybrid probabilistic adaptation mode controller for generalized sidelobe cancellers applied to multi-microphone speech enhancement [J]. Digital Signal Processing, 2014, 25(2):123-133.
- [5] Osamu Hoshuyama, Akihiko Sugiyama, Akihiro Hirano. A robust adaptive beam former for microphone arrays with a blocking matrix using constrained adaptive filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999; 47(10): 2677-2684.
- [6] Mahnoudi D, Drygajlo A. Combined Wiener and coherence filtering in wavelet domain for microphone array speech enhancement [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Washington, USA:[s. n.], 1998,5: 385-388.
- [7] 程翥,李双勋,薛洪印,等. 一种简化的单约束波束形成方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12):2673-2676.  
Cheng Zhu, Li Shuangxun, Xue Hongyin. Simplified implementation for single constrained beam-forming[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(12):2673-2676.
- [8] Liu Z, Wu S, Wang Y, et al. A new GSC beamforming algorithm based on double affine projection[C]//IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Beijing:[s. n.], 2014:1-4.
- [9] Weiss S, Stewart R W, Schabert M, et al. An efficient scheme for broadband adaptive beamforming [C]//IEEE Conference on Signal, System and Computer. California, USA;IEEE, 1999,1:496-500.
- [10] Osamu Hoshuyama, Akihiko Sugiyama, Akihiro Hirano. A robust adaptive beamformer for microphone arrays with a blocking matrix using constrained adaptive filters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999; 47(10): 2677-2684.
- [11] Schwartz O, Gannot S, Habets E A P. Multi-microphone speech dereverberation and noise reduction using relative early transfer functions [J]. Audio Speech & Language Processing IEEE/ACM Transactions on, 2015, 23:240-251.
- [12] Itakura F, Saito S. Analysis synthesis telephony based on the maximum likelihood method [C]// Proc 6th of the International Congress on Acoustics. Los Alamitos, CA; IEEE, 1968:17-20.

### 作者简介:



**李斌**(1992-),男,硕士研究生,研究方向:现代语音处理与通信技术, E-mail: 1014010632 @ njupt. edu. cn.



**张玲华**(1964-),通信作者,女,教授,博士生导师,研究方向:语音和说话人的识别和转换技术、实时语音通信技术, E-mail: zhanglh @njupt. edu. cn.

