

麦克风阵列应用于鲁棒自适应噪声消除*

杨毅¹, 余达太¹, 宋辉², 刘加²

(1. 北京科技大学 信息工程学院 133 信箱, 北京 100083;

2. 清华大学 电子工程系网络与人机语音通信研究所, 北京 100084)

摘要: 提出一种应用于鲁棒自适应噪声消除的新结构, 用优化波束形成方法取代 GSC 中的固定波束形成 (Fixed Beamforming) 以得到较宽的带宽; 对 GSC 的输出进行后滤波处理消除残余噪声。

关键词: 麦克风阵列 波束形成 通用旁瓣消除器

波束形成是一种通过控制波束的方向和形状从干扰中提取目标信号的技术。波束形成方法很多, 有延迟相加波束形成 (Delay and Sum Beamforming)、基于细胞的波束形成 (Cell-Based Beamforming) 以及基于 GSVD 的波束形成 (GSVD-Based Beamforming)^[4]。麦克风阵列中的鲁棒波束形成技术可用于噪声消除处理, 广泛应用于通信、免提电话和助听器等^[8]。

传统波束形成在实际应用中效果不佳, 原因是语者的位置以及噪声的位置发生改变, 因此产生了基于波束形成的通用旁瓣消除器 GSC^[1]。

最简单的 GSC 是 Griffiths-Jim 的 GSC^[6], 它采用固定块矩阵方法。自适应波束形成器是由 Hoshuyama 等^[2]提出的, 通过自适应改变波束的方向和形状来消除噪声。但是低频段的方向性噪声仍然会导致信噪比的误判和错误的目标跟踪^[4]。在麦克风阵列处理中, 后处理技术通过采用单信道噪声抑制滤波器来处理阵列输出。维纳滤波器是一种优化的无失真滤波器, 其误差为最小均方意义上的误差。

本文提出一种新的结构, 用宽带优化波束形成方法取代传统 GSC 中的固定波束形成方法, 并结合 Scalart 等^[3]提出的基于跟踪先验信噪比的维纳滤波的方法来处理噪声。

1 传统方法

阵列信号处理中 GSC 是一种常用而有效的算法, 主要内容是通过控制信号来获得感兴趣的目标。图 1 所示为传统 GSC 的框图, 其中包括用来获取目标的固定波束形成模块、用来获取噪声的块矩阵模块以及噪声消除模块和自适应控制器模块。

1.1 固定波束形成

最简单的多麦克噪声消除波束形成器是延迟相加波束形成器。对各个麦克风的信号进行时延和相加处理, 阵列的角度可控。波束形成的主要原理如图 2 所示,

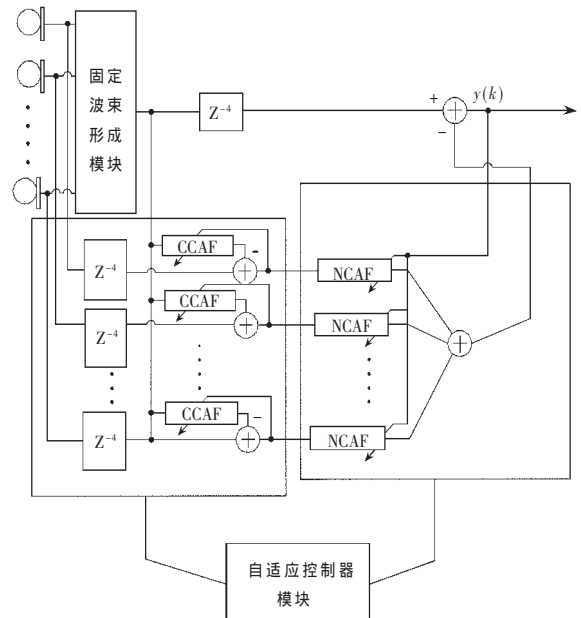


图 1 传统的 GSC 框图

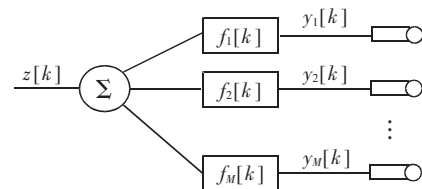


图 2 波束形成器原理

其中麦克风信号为:

$$y_m(k) = s[k - \tau_m(\theta)] \quad \tau_m(\theta) = \frac{d_m \cos \theta}{c} f_s, m = 1, \dots, M \quad (1)$$

输出信号为:

$$z[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_m[k + \Delta_m], m = 1, \dots, M \quad (2)$$

其中, $y_m[k]$ 为单麦克风信号, $z[k]$ 为阵列输出信号, M 为麦克风个数, τ_m 为时延, d_m 为麦克风间距, θ 为方向角, c 为声速。

* 国家自然科学基金项目 (60272016; 90307014)

1.2 CCAF-NCAF 结构

GSC 是线性约束最小差异 LCMV (Linearly Constrained Minimum Variance) 的一种变形,即以受约束优化代替无约束优化方法来降低自适应的复杂度。LCMV 的原理为:

$$\sum_f \min f^T \cdot R_{yy}[k] \cdot f, C^T \cdot f = b \quad (3)$$

考虑满秩矩阵:

$$U = [C \ C_a] \quad (4)$$

滤波器 f :

$$f = C \cdot v - C_a \cdot f_a \quad (5)$$

约束:

$$C^T \cdot f = C^T \cdot C \cdot v - C^T \cdot C_a \cdot f_a = b \quad v = (C^T \cdot C)^{-1} b \quad (6)$$

滤波器 f 可被分解为一个固定部分 f_q 和一个变化部分 f_a 。

$$f = C(C^T \cdot C)^{-1} b - C_a \cdot f_a \quad (7)$$

图 1 中的块矩阵通常采用系数约束自适应滤波器 (CCAF)。CCAF 类似于自适应噪声消除方法,其输入为固定波束形成法的输出,且 CCAF 的输出被时延麦克风信号减去。CCAF 的系数向量 $h_n(k)$ 采用有约束自适应 NLMS 方法,如下所示:

$$h_n'(k+1) = h_n(k) + \alpha \frac{z_n(k)}{b(k)^T b(k)} b(k) \quad (8)$$

$$h_n(k+1) = \begin{cases} \phi_n & h_n'(k+1) > \phi_n \\ \varphi_n & h_n'(k+1) < \varphi_n \\ h_n'(k+1) & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\phi_n = [\phi_{n,0}, \phi_{n,1}, \dots, \phi_{n,M_1-1}]^T \quad (10)$$

$$\Psi_n = [\Psi_{n,0}, \Psi_{n,1}, \dots, \Psi_{n,M_1-1}]^T$$

这里假设 CCAF 有 M_1 个抽头, $h_n'(k+1)$ 为时间系数向量, ϕ_n 和 Ψ_n 分别为系数的上下边界。

标准约束自适应滤波器 NCAFs (Norm-Constrained Adaptive Filters) 采用标准的约束算法如下:

$$w_n = w_n(k) + \beta \frac{y(k)}{z_j(k)^T z_j(k)} z_n(k) \quad (11)$$

$$\Omega = w_n'^T w_n' \quad (12)$$

$$w_n(k+1) = \begin{cases} \sqrt{\frac{K}{\Omega}} w_n' & \Omega > K \\ w_n' & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

2 波束形成和后处理结构

2.1 优化自适应波束形成法

延时相加波束形成法产生空间频域混淆现象,在图 3 中可以明显看出。为了避免这一现象,引入空-时宽带滤波器。此滤波器采用基于频率的复权重以得到整个频带上的期望响应^[4]。其原理为力图产生期望的波束形状,为此设计优化策略为:

$$w = \operatorname{argmin}_w \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (|H(\omega, \theta)| - |P(\omega, \theta)|)^2 d\omega d\theta \quad (14)$$

这里, $H(\omega, \theta)$ 为当前波束形状, $P(\omega, \theta)$ 为期望波束形状, w 为优化权重向量。图 4 显示了一个宽带的方向响应。

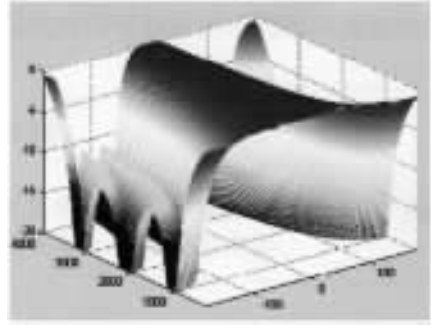


图 3 延时相加波束形成法

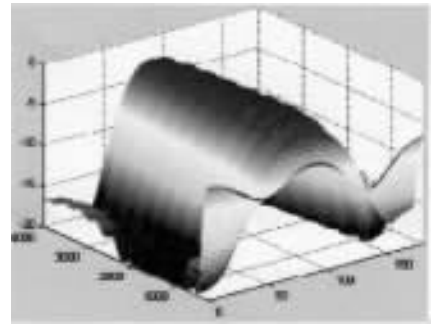


图 4 优化自适应波束形成法

2.2 维纳后处理滤波

维纳滤波是对信号的线性优化估计,其原理如下:

$$W(f_1, f_2) = \frac{H^*(f_1, f_2) S_{xx}(f_1, f_2)}{|H(f_1, f_2)|^2 S_{xx}(f_1, f_2) + S_{mm}(f_1, f_2)} \quad (15)$$

这里 $S_{xx}(f_1, f_2)$ 和 $S_{mm}(f_1, f_2)$ 分别代表原始信号和加性噪声的能量谱。本文中采用 Scalart^[3] 提出的基于 Decision-Directed 方法获得先验信噪比的维纳滤波作为后滤波方法。此方法假设后信噪比等于先验信噪比加 1。

3 仿真和实验

用传统 GSC 与本文提出的方法下对噪声的抑制能力进行仿真实验和比较,麦克风阵列的参数为: $M=4$, $d=4\text{cm}$, $f_s=16\text{kHz}$ 。目标信号为纯净女声,噪声为来自 45 度角的白噪声。经比较得到在固定波束形成法、传统 GSC 法、优化波束形成法、GSC 及优化波束形成法以及本文提出的方法下对噪声的抑制能力,如表 1 所示。处理前的原始信号如图 5 所示,经过传统 GSC 处理的信号

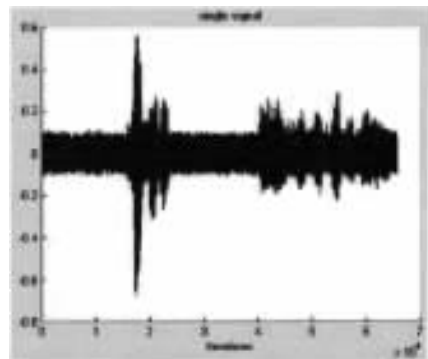


图 5 原始信号波形

如图 6 所示,经过本文提出的结构而得到的信号如图 7 所示。

表 1 结果比较

方法	噪声抑制能力(dB)
固定波束形成法	6.54
传统 GSC 法	8.38
优化波束形成法	10.67
GSC 及优化波束形成法	12.91
本文提出的方法	22.31

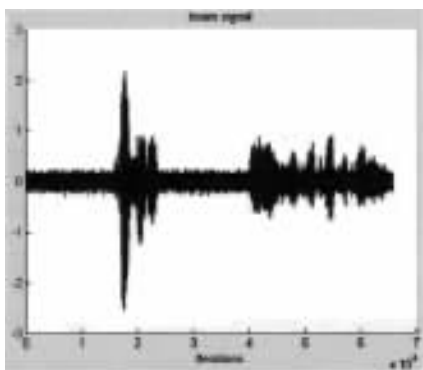


图 6 传统 GSC 输出波形

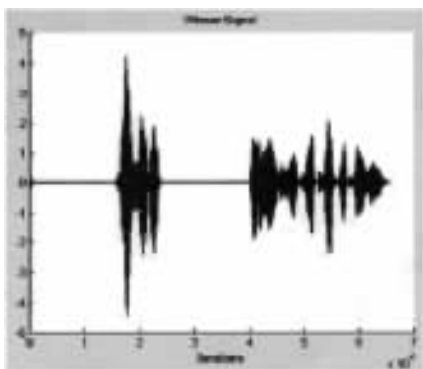


图 7 采用本文提出方法处理后的结果

本文提出一种改进的 GSC 噪声消除结构来消除加性噪声,通过仿真实验证明此结构可获得很好的噪声抑制效果。

参考文献

- [1] WEIFENG Li, TAKEDA K, ITAKURA F. Adaptive log-spectral regression for in-car speech recognition using multiple distributed microphones. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2005:340-343.
- [2] HOSHUYAMA O, SUGIYAMA A, HIRANO A. A robust adaptive beamformer for microphone arrays with a blocking matrix using constrained adaptive filters. *IEEE Trans. On Signal Processing*, 1999,47(10):2677-2684.
- [3] SCALART P, FILHO J V. Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings, 1996 IEEE International Conference, 1996,2(5):629-632.*
- [4] DOCLO S, CLIPPEL E D, MOONEN M. Multi-microphone noise reduction using GSVD-based optimal filtering with ANC postprocessing stage. In *Proc. of DSP2000 Workshop, Hunt, TX, USA, Oct.2000.*
- [5] SPRIET A, MOONEN M, WOUTERS J. Robustness analysis of multichannel wiener filtering and generalized sidelobe cancellation for multimicrophone noise reduction in hearing aid applications. *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions*, 2005, 13(4):487-503.
- [6] GRIFFITHS L J, JIM C W. An alternative approach to linear constrained adaptive beamforming. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1982, AP-30:27-34.
- [7] MARRO C, MAHIEUX Y, SIMMER K U. Analysis of noise reduction and dereverberation techniques based on microphone arrays with postfiltering. *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, 1998, 6(3):240-259.
- [8] FLANAGAN J L, BERKLEY D A, ELKO G W et al. Autodirective microphone systems. *Acustica*, 1991, 73(2): 58-71.
- [9] HOU Z R, JIA Y. A new adaptive blocking matrix with exact FIR structure for robust generalized sidelobe canceller. *International Workshop Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC2003)*, 2003, 9:239-242.

(收稿日期:2006-07-19)