

非均匀傅里叶变换频率不变波束形成方法

王冬霞 周城旭 韩 颖 孙福明

(辽宁工业大学电子与信息工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 频率不变波束形成是宽带阵列信号处理研究的重要内容之一。本文以麦克风阵列语音处理为研究对象, 针对 FIB 低频处波束形成一致性不理想的问题, 提出了一种基于非均匀傅里叶变换的频率不变波束形成方法。该方法采用非均匀采样来增加低频处的采样点数, 构建符合非均匀傅里叶逆变换的范德蒙矩阵, 再用优化对称窗函数对变换结果进行截取, 得到空时滤波器。该方法不仅实现了低频段与期望波束响应近似的波束图, 且降低了阵元数目。计算机仿真实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 频率不变波束形成; 麦克风阵列; 非均匀傅里叶变换; 波束响应; 空时滤波

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)06-0691-06

A Non-uniform Fourier Transformation Method for Frequency Invariant Beamforming

WANG Dong-xia ZHOU Cheng-xu HAN Ying SUN Fu-ming

(School of Electronic & Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

Abstract: Frequency invariant beamforming is an important research direction of broadband array signal processing. Considering the application of speech processing based on microphone array, a novel frequency invariant beamforming method based on non-uniform Fourier transformation is proposed to solve the frequency invariant property even for the lower frequencies of FIB in this paper. This proposed method represents Vandermonde matrix for non-uniform Fourier inverse transformation, in which the data of low frequency sampling is increased. Then an optimal symmetric window function is presented to process it. The spatial-temporal filter was constructed in the end. Thus not only the approximating expected beam response is obtained even for the low frequency band, but also the number of sensors is reduced. The computer simulation results show that the proposed method is effective.

Key words: Frequency invariant beamforming; Microphone array; Non-uniform Fourier transformation; Beam response; Spatial-temporal filtering

1 引言

在一些如视频会议、声纳和 underwater 通信等典型应用中, 阵列接收的往往是宽带信号。阵列在接收信号不同频率处所产生的不同增益导致了阵列输出信号波形失真, 且带宽越宽, 失真越严重, 即阵列在信号不同频率处的响应不能忽略。因此, 有必要研究宽带波束形成方法。近年来, 许多学者将频率不

变波束形成技术(Frequency Invariant Beamformers, FIB) 作为其研究重点^[1-10]。

所谓 FIB 技术, 是指阵列接收的信号在特定频带内所形成的波束与频率无关且束宽恒定。按照阵列的拓扑结构, FIB 技术可以分为基于一维阵列的 FIB 技术和基于多维阵列的 FIB 技术。对于一维阵列来讲, 有采用基于 Bessel 函数的方法、广义全通加权的时域滤波方法^[5]和基于子带分解的方法^[6]。考虑到

收稿日期: 2012-09-07; 修回日期: 2013-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60901063); 辽宁省杰出青年成长支持计划项目(LJQ2011066)

圆阵可以提供 360° 的方位角信息, Chen 等^[7] 提出了基于均匀圆阵和同心圆阵的多维阵列 FIB 方法。这些方法均为基于特定的阵列拓扑结构, 且对于大孔径线阵、平面阵和三维阵列来讲, 其算法复杂度较高。Wei Liu 等提出基于傅里叶变换的 FIB 技术^[8-10], 采用频率替换方法, 在感兴趣的频率范围内对频率均匀采样, 然后进行傅氏逆变换, 进而构造空间时域滤波器。该方法复杂度较低, 且具有扩展性, 即可任意设定期望的频率不变波束图, 适合不同的阵列拓扑结构。一方面阵列波束形成是信号频率的函数, 另一方面由于采用均匀采样傅里叶变换, 在其选定频率范围内 ($0 \sim 12\text{kHz}$), 低频段 (低于 2kHz) 采样点数少于高频段 (高于 2kHz)^[9]。因此, 采用该方法所形成的阵列波束图, 相比与高频段, 低频段波束形成一致性不理想。进而在一定程度上限制了其适用范围。

基于此, 针对麦克风阵列语音处理的特点, 提出了一种基于一维非均匀采样傅里叶变换的 FIB 方法, 在傅里叶变换过程中, 采用非均匀采样来增加低频处 (低于 2kHz) 的采样点数, 构建符合非均匀傅里叶逆变换的范德蒙矩阵, 再以窗函数进行对称优化截取, 得到空时滤波器。由于摒弃了频率均匀采样, 使得算法能够适应傅氏变换 FIB 技术低频处的波束形成一致性。

2 一维线阵的阵列波束响应

如图 1 所示, 一维均匀线阵的两个阵元间距为 Δx , 空间期望语音源以倾角 θ 的平面波入射阵列, 角频率为 ω , 波长为 λ 。为了避免混叠失真, 阵列间距因满足阵列空间采样定理

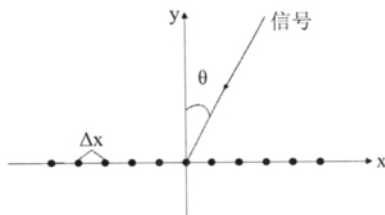


图 1 等间距分布的线性阵列

Fig. 1 Equally spaced linear array

$$\Delta x < \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (1)$$

其中 λ_{\min} 为信号最小波长。于是, 阵列波束响应为

$$P(\omega, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} D(m\Delta x, \omega) e^{-j\frac{\omega \sin \theta m \Delta x}{c}} \quad (2)$$

其中 c 是声速, $D(m\Delta x, \omega)$ 是第 m 个阵元位置处的频率响应。令

$$\omega_1 = \frac{\omega \sin \theta \Delta x}{c} \quad (3)$$

得

$$P(\omega_1, \omega) = \sum_{m=0}^{M-1} D(m\Delta x, \omega) e^{-jm\omega_1} \quad (4)$$

即阵列波束响应 $P(\omega_1, \omega)$ 和 $D(m\Delta x, \omega)$ 是一对傅里叶变换对。

3 非均匀傅里叶变换的频率不变波束形成

为了确保波束形成的频率不变性, 即 $P(\omega_1, \omega)$ 函数应与仅与 θ 有关, 与频率 ω 无关。设定理想频率不变波束为 $F(\sin \theta)$, 即

$$P(\omega_1, \omega) = \begin{cases} F(\sin \theta), & |\sin \theta| \leq 1 \\ A(\theta), & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

然后进行 $\sin \theta = \left(\frac{\omega_1 c}{\omega \Delta x} \right)$ 的替换, 即

$$P(\omega_1, \omega) = \begin{cases} F\left(\frac{c\omega_1}{\omega \Delta x}\right), & |\omega_1| \leq \left|\frac{\omega \Delta x}{c}\right| \text{ 且 } \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \\ A(\omega_1), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$A(\omega_1)$ 是有限长任意函数。 $D(m\Delta x, \omega)$ 的傅里叶变换 $P(\omega_1, \omega)$ 是周期为 2π 的周期函数。因为 $\omega_1 \in [-\pi, \pi]$ 又 $|\sin \theta| \leq 1$, 所以 $F\left(\frac{c\omega_1}{\omega \Delta x}\right)$ 在图 2 的阴影区域有定义。

为提高低频处 FIB 波束形成一致性, 需要在波束形成过程中低频处获得更多的频率信息。因此, 在频率 ω_1 较低处沿两个坐标轴方向增加采样点数目 (如图 2 所示), 采样点间隔成递增序列, 且确保频率 ω 的采样点在低频处更加密集, 即增加式 (6) 中变量有效区域 (阴影部分) 的低频处采样点数目 (阴影区域黑点所示), 然后对 $P(\omega_1, \omega)$ 进行关于变量 ω_1 的一

维非均匀傅里叶逆变换,进而得到在 $m\Delta x, m = \dots, -1, 0, 1, \dots$ 位置的阵元理想频率响应 $D(\tilde{m}\Delta x, \omega)$ 。

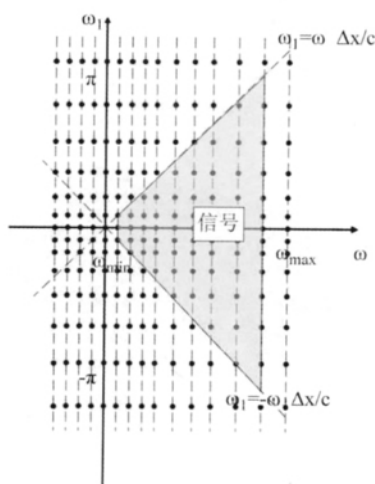


图2 非均匀采样采样点分布图

Fig. 2 Non-uniform Sampling point pattern

于是,构建非均匀傅里叶逆变换矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\omega_{10}} & e^{-j2\omega_{10}} & \dots & e^{-j(\tilde{M}-1)\omega_{10}} \\ 1 & e^{-j\omega_{11}} & e^{-j2\omega_{11}} & \dots & e^{-j(\tilde{M}-1)\omega_{11}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j\omega_{1\tilde{M}-1}} & e^{-j2\omega_{1\tilde{M}-1}} & \dots & e^{-j(\tilde{M}-1)\omega_{1\tilde{M}-1}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

B 是关于 \tilde{M} 个非均匀采样点 $e^{j\omega_{10}}, e^{j\omega_{11}}, \dots, e^{j\omega_{1\tilde{M}-1}}$ 的范德蒙矩阵,即

$$\det(B) = \prod_{i \neq j} (e^{j\omega_{1i}} - e^{j\omega_{1j}}) \quad (8)$$

由式(8)可知 B 是非奇异矩阵。所以,关于变量 ω_1 的非均匀傅里叶逆变换存在且唯一。

对 $P(\omega_1, \omega)$ 进行 \tilde{M} ($\tilde{M} > M$) 点的非均匀傅里叶逆变换得到 $D(\tilde{m}\Delta x, \omega)$, 即

$$D(\tilde{m}\Delta x, \omega) = B^{-1}P(\omega_1, \omega) \quad (9)$$

为了匹配 M 个阵元的一维线阵,需要用窗函数对所得到的 $D(\tilde{m}\Delta x, \omega)$ 进行截取至 M 个点,可以用矩形窗 $\omega(n) = R_N(n)$, 得到 $D(m\Delta x, \omega)$ ($m = 0, 1, \dots, M-1$), 即

$$D(\tilde{m}\Delta x, \omega)\omega(m) = \begin{cases} D_1(\tilde{m}\Delta x, \omega), & 0 \leq m \leq \frac{M-1}{2} \text{ 且 } 0 \leq \tilde{m} \leq \frac{M-1}{2} \\ D_2(\tilde{m}\Delta x, \omega), & \frac{M+1}{2} \leq m \leq M-1 \text{ 且 } \tilde{M} - \frac{M+3}{2} \leq \tilde{m} \leq \tilde{M}-1 \\ 0, & \tilde{m} \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (10)$$

$$D(m\Delta x, \omega) = [D_2(\tilde{m}\Delta x, \omega) \ D_1(\tilde{m}\Delta x, \omega)] \quad (11)$$

则波束响应 $P(\omega, \theta)$ 为

$$P(\omega, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} D(m\Delta x, \omega) e^{-j\frac{\omega \sin \theta m \Delta x}{c}} \quad (12)$$

$P(\omega, \theta)$ 与目标波束接近,具有频率不变性。

4 计算机仿真与实验结果

为验证基于非均匀傅里叶变换 FIB 方法对语音源波束形成一致性效果,分别采用 21 和 31 个阵元麦克风组成的均匀线阵拓扑结构,并将波束形成一致性结果与文献[9]的方法及窄带波束形成方法分别进行比较。

4.1 计算机仿真设计

目标波束设定为

$$F_{1D}(\sin \theta) = \sum_{m=-3}^3 h_m e^{-jm\pi \sin \theta} \quad (13)$$

其中,系数 $\{h_{-3}, h_{-2}, \dots, h_2, h_3\}$ 的具体值分别为^[8]:

$$\{h_m\} = [0.0307 \ 0.2028 \ 0.1663 \ 0.2004 \ 0.1663 \ 0.2028 \ 0.0307]$$

期望波束图如图3所示。

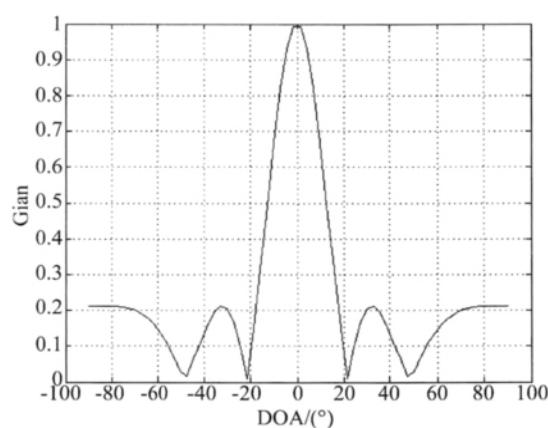


图3 期望波束图

Fig. 3 Beam pattern of expectation

方案一:采用一维线阵阵元数目为 21,信号频率范围设为 $0 \sim 12\text{kHz}$,传播速度为 340m/s ,则阵元间距为 1.42cm 。频率 ω_1 的频点沿坐标轴,非均匀采样 64 个频点,并且频点间距成递增序列;频率 ω

在 0 ~ 3kHz 频段均匀采样 98 个频点, 在 3 ~ 12kHz 频段取相同数目的频点。

方案二: 采用一维线阵, 阵元数目为 31, 其他参数设置同方案一。

4.2 仿真结果分析

按照上面的设计方案, 本文对两种情况分别进行实验, 实验结果分别如图 4~图 7 所示。信号在 (0 ~ 2kHz) 频率范围内, 利用延时求和波束形成方法, 得到波束图如图 4 所示。

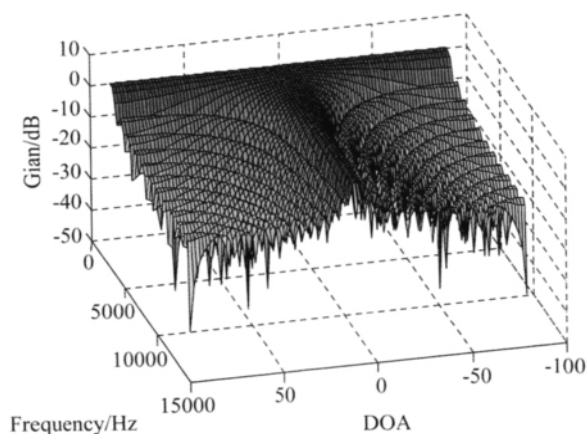


图4 窄带波束形成方法的波束图

Fig. 4 Beam pattern of narrow-band

与图 3 所示的期望波束图相比, 图 4 所示波束图失真较大。表明若采用窄带波束形成方法, 对于宽带信号源而言, 阵列对不同频率所形成的增益不同, 波形失真较大。因此, 对于宽带信号源而言, 必须采用宽带阵列如 FIB 方法。

方案一中, 文献 [9] 中 Wei 经典频率不变波束形成方法所产生的波束图如图 5 所示。与图 4 相比, 在整个频率范围内, 文献 [9] 均匀采样 FIB 方法取得了较好的频率不变性, 与期望波束图相似。但从图 5 中也可以看出, 语音信号频率范围如低于 2kHz 的频率段, 其波束图的一致性较差。

本文方法阵列波束图如图 6 所示。与图 5 相比, 在低频段尤其是频率为 (875 ~ 2000Hz) 频段, 频率不变波束图的一致性得到较大改善。另一方面, 尽管该方法低频处采样点增加, 但总采样点数保持不变, 故并没有增加其算法实际运算的复杂度, 机器仿真运行

时间基本相同。

考虑到语音信号所处的频率范围是 300 ~ 3400Hz, 所以截取图 5 与图 6 的 500 ~ 3500Hz 频段的波束图如图 7 所示, 与文献 [9] Wei 方法相比, 本文方法在所研究的低频处具有良好的一致性。

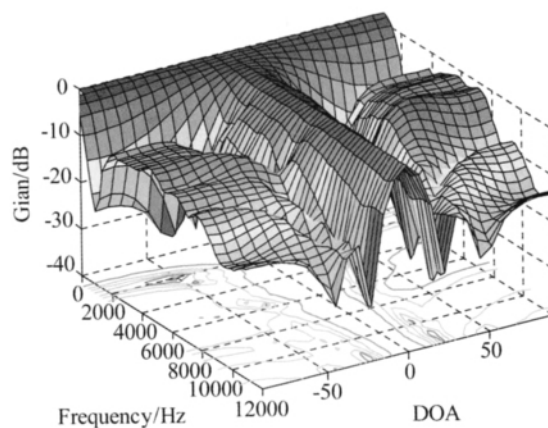


图5 基于傅氏变换的频率不变波束图

Fig. 5 Frequency invariant beam pattern based on fourier transformation with 21 arrays

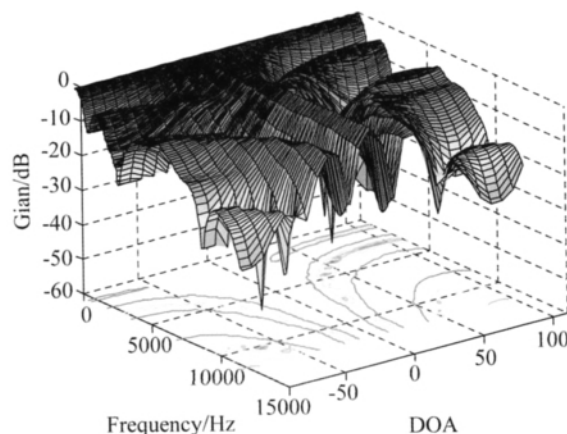


图6 基于非均匀采样傅氏变换频率不变波束图

Fig. 6 Frequency invariant beam pattern based on non-uniform fourier transformation with 21 arrays

方案二增加阵元数目, 文献 [9] Wei 经典频率不变波束形成方法所产生在 500 ~ 3500Hz 频段的波束图如图 8 所示。从图 8 中看出, 随着阵元数的增多, 低频段波束形成性能得到改善, 其结果与方案一中本文方法得到结果相似 (如图 7(b) 所示)。也就是说, 该方法低频处波束形成一致性的取得, 是以牺牲阵元数目为代价。

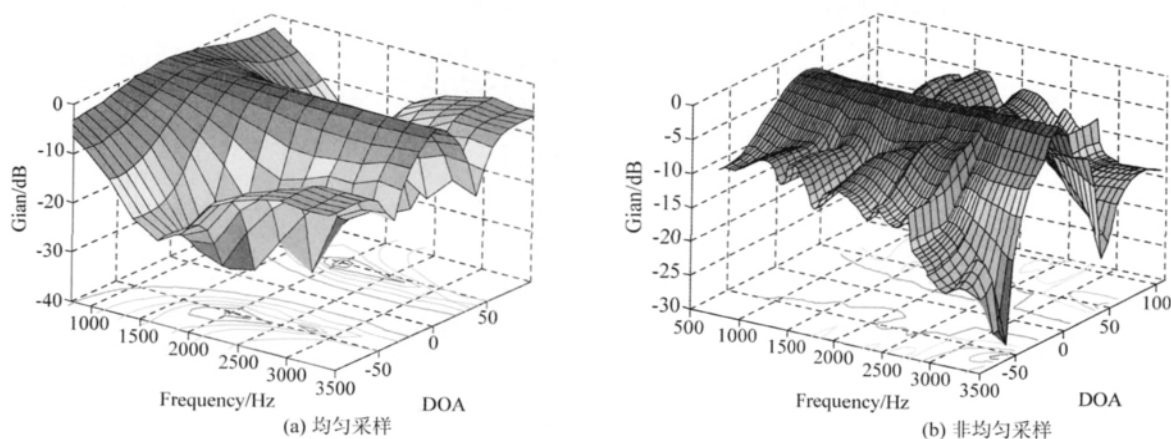


图7 基于傅氏变换的频率不变波束图(21个阵元 500~3500Hz频段)

Fig. 7 Frequency invariant beam pattern based on Fourier transformation with 21 arrays for 500 ~ 3500Hz

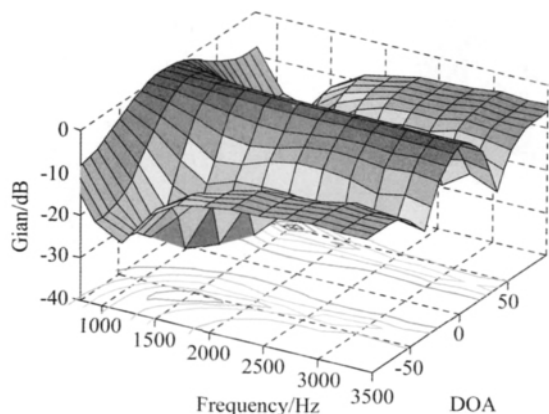


图8 基于傅氏变换的频率不变波束图
(31个阵元 500~3500Hz频段)

Fig. 8 Frequency invariant beam pattern based on fourier transformation with 31 arrays for 500 ~ 3500Hz

5 结束语

频率不变波束形成 FIB 技术用来解决阵列信号处理中的宽带波束形成问题。本文提出的基于一维非均匀傅里叶变换的频率不变波束形成方法,实现了 FIB 低频段的波束形成一致性。该方法通过 DFT 非均匀采样调整采样密度,实现低频段采样点数的增加,通过对理想波束响应的优化截取,不仅在低频段实现了与期望波束响应近似的波束图,而且降低了阵元数目。仿真实验结果验证了该方法的有效性。该方法可以推广到二维平面阵列和三

维立体阵列中。

参考文献

- [1] Xin Zhang, Wee Ser Zhang, Anoop Kumar Knishna. Selective frequency invariant uniform circular broadband beamformer[J]. EURASIP Journal on advances in signal processing, 2010, (2): 2201-2204.
- [2] Yong Zhao, Wei Liu, Richard J. Langley. Efficient design of frequency invariant beamformers with sensor delay-lines[C]. Sensor array and multichannel signal processing workshop, Sheffield, July 21-23 2008: 335-339.
- [3] Lucas C. Parra. Least squares frequency-invariant beamforming[C]. IEEE workshop on Applications of signal processing to Audio and Acoustics, New York, Oct, 16, 2005: 102-105.
- [4] 唐建生, 孙超. 时域宽带恒定束宽波束形成器的优化设计[J]. 信号处理, 2006, 22(6): 805-809.
Tang Jian-sheng, Sun Chao. Optimum Design on Time Domain Broadband Beamformer with Constant Beamwidth[J]. Signal Processing, 2006, 22(6): 805-809. (in Chinese)
- [5] 朱维杰, 孙进才, 朱思宇. 基于 DFT 插值的线性约束最小方差宽带自适应阵列[J]. 应用声学, 2004(1): 17-22.
Zhu Wei-jie, Sun Jin-cai. Linearly constrained minimum variance broadband adaptive array based on DFT interpo-

- lation[J]. *Applied Acoustic*, 2004(1): 17-22. (in Chinese)
- [6] Yong Zhao ,Wei Liu ,Richard J. Langley. Design of frequency invariant beamformers in subbands[C]. *IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing*, Sheffield, Aug. 31-Sept. 3 2009: 201-204.
- [7] S. C. Chen ,H. H. Chen. Uniform concentric circular arrays with frequency-invariant characteristics-theory , design ,adaptive beamforming and DOA estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007 ,55(1): 165-177.
- [8] Wei Liu ,Stephan Weiss. Design of frequency invariant beamformers for broadband arrays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008 ,56(2): 855-860.
- [9] Wei Liu ,Stephan Weiss ,John G. McWhirter ,Ian K. Proudler. Frequency invariant beamforming for two-dimensional and three-dimensional arrays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007 ,55(1): 2535-2543.
- [10] Wei Liu ,Stephan Weiss. Design of frequency-invariant beamformers employing multi-dimensional fourier transforms [C]. *The Fourth International Multidimensional Systems*, London , July ,10-13 2005: 19-23.

作者简介



王冬霞 女,1975 年 12 月生,辽宁海城人。大连理工大学信号与信息处理专业博士学位;副教授,硕士生导师。主要研究方向为阵列处理、语音处理与通信技术。E-mail: dxwang_lg@ 126. com



周城旭 女,1987 年 9 月生,辽宁锦州人,硕士。主要研究方向为波束形成与语音增强的理论与应用。E-mail: zhoucheng177@ 163. com



韩 颖 女,1987 年 10 月生,河北唐山。研究生在读,主要研究方向为阵列处理和语音识别的理论与应用。E-mail: hanying19871010@ 126. com



孙福明 男,1972 年 10 月生,辽宁瓦房店人。中国科学技术大学、信息与通信工程专业工学博士学位,副教授。主要研究方向为图像语义理解、机动目标跟踪及自然语言处理。E-mail: sun-friends@ sohu. com