

基于广义逆波束形成的扩展性噪声源定位 误差影响因素仿真研究

叶虹敏, 王强, 袁昌明, 范昕炜

(中国计量学院质量与安全工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 实现噪声控制的前提是正确识别出主要的噪声源, 研究噪声源空间指向性对于噪声源的辨识和预测有重大意义。为提高复杂声源的分辨率, 以单极子点源形成扩展性声源表征噪声源, 引进广义逆波束形成算法对扩展性声源进行声源定位。通过仿真计算, 分析了广义逆波束形成(Generalized Inverse Beamforming, GIB)算法中麦克风阵列阵元数、测量距离对定位效果的影响, 系统比较了去自谱算法和 GIB 算法对点声源、扩展性声源(5 个紧密相连的单极子点源)的分辨率。仿真表明: GIB 算法中定位效果受阵元数目影响不大, 相对提高了点声源的定位精度, 而且能分辨出扩展性声源。

关键词: 扩展性声源; 广义逆波束形成; 去自谱算法; 声源定位

中图分类号: TB52

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-04-0368-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.04.015

Simulation research on error influence factors extended acoustic sources identification based on generalized inverse beamforming

YE Hong-min, WANG Qiang, YUAN Chang-ming, FAN Xin-wei

(College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 3100318, Zhejiang, China)

Abstract: The essential requirement for noise control is to identify the noise sources accurately. The space directivities of these noises play important roles in the acoustic sources identification and prediction. To improve the space resolution of noise-source maps, the extended acoustic source (which consists of some monopole sources in a certain shape) is used to model the noise-source. The generalized inverse beamforming (GIB) algorithm is performed to discriminate the complex extended acoustic sources. Based on the simulation, the performances of GIB algorithm are discussed, such as the relationship between sound sources identification performance and the number of microphones, the influence of measuring distance, the space resolution of GIB. Then the extended autospectra algorithm and GIB algorithm were compared by the identification of point source, extended sources (multiple monopole sources were closely placed). The result shows that the identification performance of GIB algorithm is not easy to be influenced by the number of microphone array. Compared with autospectra algorithm, the better performance of point sources and extended sources localization was gained.

Key words: extended acoustic sources; generalized inverse beamforming; autospectra algorithm; sources identification

0 引言

基于“延时-求和”的波束形成算法在阵元数目较多时操作简单且不受声源相关性的影响^[1-4], 适合中高频声源识别和中长距离的测量^[5], 定位精度由声源模型、阵列结构、阵元数目及处理算法等因

素综合决定。常规的波束形成算法为了简化算法中的数学复杂性, 通常不论声源的大小和特性均将其视为点声源来处理, 往往导致由于声源模型选择的随机性而使识别结果误差较大。例如, 对于高铁轨道噪声, 其强弱、频率都会随列车工作状态的不同而变化, 如将列车轨道噪声视为单极子点源辐射, 则其线源的水平指向性难以预测^[6], 实际应用中, 高速列车轨道噪声通常视为扩展源^[7,8]。对声源模型的改进, 会带来更精确的声传播模型, 提出更精致的信号处理算法, 获得更好地性能表现。由 Takao 等人提出的广义逆波束形成^[9](Generalized Inverse Beam-forming, GIB)算法运用广义逆原理, 逆向求

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275498)、质检公益性行业科研专项(201410027、201410028)资助。

作者简介: 叶虹敏(1990—), 女, 浙江省临安人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 王强, E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

解噪声源声压分布,通过迭代,考察目标域内各网格点所对应的能量函数,逐步抛弃那些不可能包含噪声源的区域,随着迭代的深入,逐渐缩小搜索区域,直到声源所在区域足够小,该方法能极大地减小计算量,而且可以识别相干或非相干声源、分布式或者多极子声源,较常规波束形成有更精准的分辨率,因此被广泛应用于飞机机翼、引擎、起重机、风力机等复杂性噪声源识别中。

本文将基于传声器阵列的广义逆波束形成算法应用到扩展性噪声源的定位系统中,为噪声识别在实际应用中的模型建立、算法优化提供理论支持。杨洋等人提出了基于除自谱的互谱矩阵波束形成算法,该算法排除了通道自噪声等干扰信号,降低了最大旁瓣级,能够实现对声源平面内单一声源和多相干声源准确识别^[10]。基于此,为了验证 GIB 算法在扩展性声源识别中的有效性和实用性,文中仿真分析了 GIB 算法中传声器个数(4×4, 8×8, 16×16)、测量距离对声源定位效果的影响,系统比较了去自谱算法和 GIB 算法对点声源、扩展性声源(5个紧密相连的单极子点源)的分辨精度。

1 广义逆波束形成原理

1.1 广义逆技术

扩展源认为是由空间上多个离散单极子点源按照一定阵列形状、阵列增益、相邻阵元间相位关系排列在一起,形成具有空间指向性的紧密信号束。扩展性声源模型如图1所示。

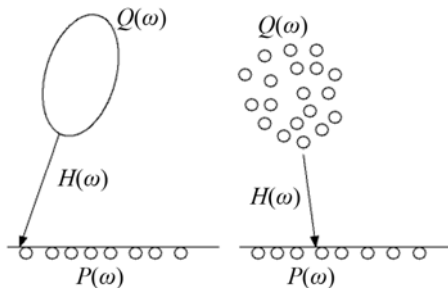


图1 扩展性声源模型
Fig.1 Model of extended sources

声源点和测量点间的关系可表示为

$$P_m = \sum_n H_{m,n} \cdot Q_n \quad (1)$$

式中: P_m 为第 m 个传声器接收到的声压信号, Q_n 为 n 个单极子点声源, 传递函数矩阵 H 为 $m \times n$ 矩阵(m 为阵元个数, n 为声源数目), 显然这是奇异矩阵不能直接求解, 本文借助广义逆求解矩阵方程的解, 从而重现源信号的空间分布:

$$Q = H^+ \cdot P \quad (2)$$

广义逆 H^+ 是对常逆矩阵的推广, 当 $m > n$ (超定) 时, $H^+ = [H^H H]^{-1} H^H$; 当 $m < n$ (欠定) 时, $H^+ = H^H [H^H H]^{-1}$ 。

1.2 广义逆波束形成

广义逆波束形成(GIB)是基于广义逆的波束形成算法, 对传声器接收到的时域信号进行傅里叶变化转化为频域信号, 构建交叉谱矩阵 R 。

$$R = \langle P \cdot P^H \rangle \quad (3)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示均值, 交叉谱矩阵 R 是基于阵列测量的波束形成展开的, 常规波束形成直接对接受的信号进行延迟求和处理, 麦克风产生的通道自噪声等干扰信号体现在交叉谱矩阵 R 的对角元素上, 通过对交叉谱矩阵 R 的奇异值分解, 可分离出噪声和信号, 其中各阵元上的噪声相互统计独立, 且噪声与信号是统计独立的。

$$R = U \Lambda U^H \quad (4)$$

如式(4)所示, 矩阵 U 由交叉谱矩阵 R 的特征向量组成, Λ 是由 R 的特征值组成的对角矩阵。

$$v_i = \sqrt{\lambda_i} u_i \quad (5)$$

本征模式 v_i 可表征源信号的分布^[9], 如式(5)所示, 其中 u_i 为矩阵 U 中的每一组列向量, λ_i 为其对应的特征值。

在声源面上设定目标领域, 用本征模式描述目标域内每个网格点上阵元接收的信号。

$$v_i = H a_i \quad (6)$$

式中, a_i 代表了目标域内的源向量。

设目标域内的网格点数为 N , 当 $m > N$ (超定) 时, $H^+ = [H^H H]^{-1} H^H$; 当 $m < N$ (欠定) 时, $H^+ = H^H [H^H H]^{-1}$, 用广义逆求解方程(6), 得到源向量 a_i 。

越接近声源真实位置的目标网格点所形成的声压信号越大, 广义逆波束形成算法通过除去 a_i 中较小声压信号的网格位置, 来缩小声源的目标位置, 从而提高声源定位的精确度。每次迭代, 以 $\beta^k \cdot N \cdot m$ 产生新的网格点数($0 < \beta < 1$, k 为迭代次数, β 为迭代中的衰减系数), 重新构造传递函数矩阵 H' ^[9], 用式(6)产生新的源向量 a'_i 。

2 算法仿真

本文将广义逆波束形成算法运用于扩展性噪声源定位中, 对比分析基于去自谱的互谱矩阵波束形成算法和 GIB 算法对噪声源的定位精度。GIB 算法对声源定位的效果, 对初始化时选择的随机点位

置及个数有很大的依赖,为了减少计算声源位置所花费的时间,仿真中,在声源平面上取大小为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,场点数目为 67×67 ,相邻场点间隔 3 cm 的矩形网格场点区域,在该区域中假定噪声源。实际信号采集过程中需要考虑到背景干扰噪声及采集通道的电噪声等,因此取信噪比 $SNR=10\text{ dB}$ 。

仿真条件为:声音在空气中的传播速度为 $c=340\text{ m/s}$,声源频率为 $f=3\text{ kHz}$,传声器阵列为矩形阵列,阵元间距取 $d=\lambda/2$,即 $d=5.7\text{ cm}$,信噪比 $SNR=10\text{ dB}$ 。

本文基于 GIB 算法对声源定位进行仿真模拟,取迭代衰减系数 $\beta=0.9^{[9]}$ 。图 2 中阵列面与声源面

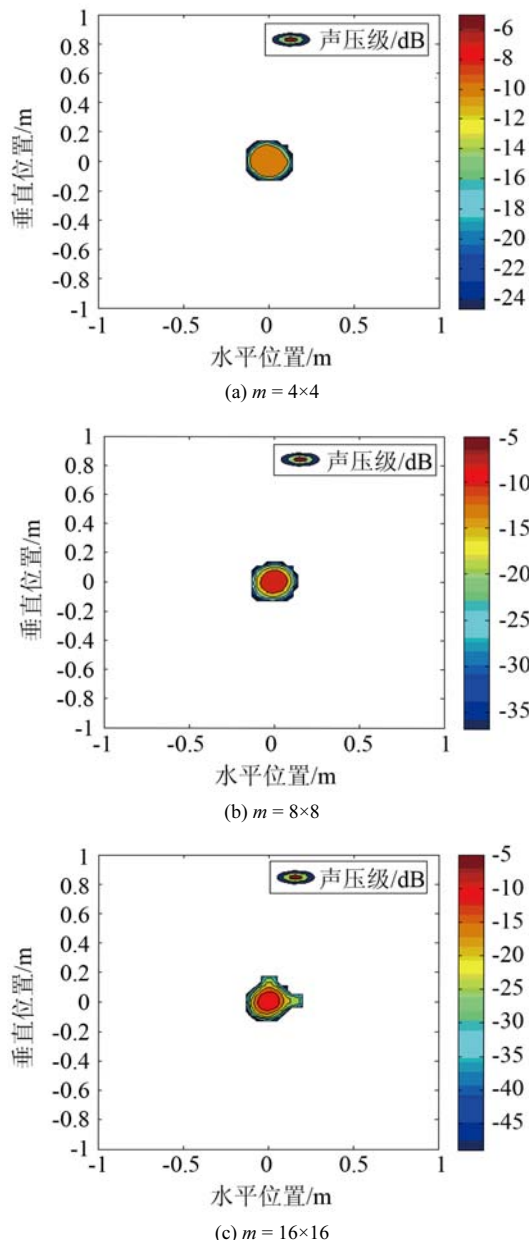


图 2 不同阵元数 GIB 算法的定位效果

Fig.2 Identification of sources based on GIB algorithm under different numbers of microphones

间距为 1 m ,声源实际坐标为 $[0\text{ m}, 0\text{ m}]$,在不同阵元数 m 条件下,用 GIB 算法对单个点声源进行仿真分析。

传统波束形成定位算法中,在阵间距一定的情况下,增加传声器的数量能提高系统的分辨率,而图 2 所示的 GIB 算法中,阵元数目对声源的定位精度影响不大,可以使信号接收阵列所需要的阵元数目大幅度降低,更具有实际适用性。

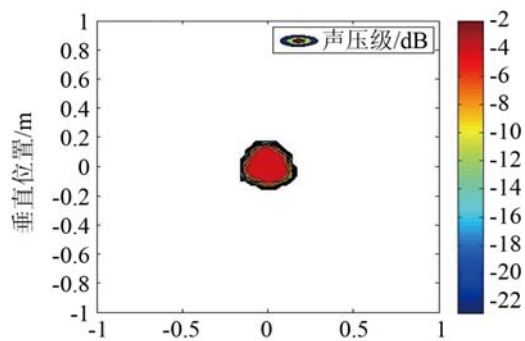
在实际应用中,阵列面和声源面存在一定的测量距离,图 3 的模拟仿真结果显示不同测量距离 z 下 GIB 算法对点声源定位的准确度,其中,阵元数为 8×8 ,声源实际坐标为 $[0\text{ m}, 0\text{ m}]$ 。图 3 各图中均在 $[0\text{ m}, 0\text{ m}]$ 声源位置出现幅值较高的红色声学中心;图 3(a)与 3(b)声学中心的宽度相近,但显著窄于图 3(c)、3(d);各图均在非声源位置很少出现旁瓣。由图 3 可得 GIB 算法能有效衰减旁瓣,但受测量距离影响较大。

图 4 中阵列面与声源面间距为 1 m ,阵元数为 8×8 ,声源实际坐标为 $[0\text{ m}, 0\text{ m}]$,图 4(a)~4(c)为不同迭代次数 k ,GIB 算法对单个点声源的定位效果,图 4(d)为去自谱算法对点声源的定位效果。

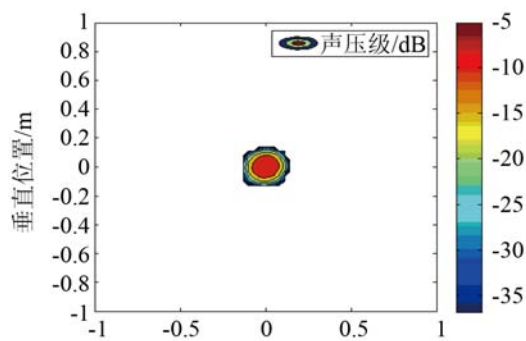
图 4 中迭代次数 $k=43$ 时,GIB 算法的最大旁瓣级为 -7.79 dB ,定位算法所需时间 $t=19.51\text{ s}$; $k=50$ 时,最大旁瓣级为 -6.68 dB , $t=22.34\text{ s}$; $k=60$ 时,最大旁瓣级为 -3.95 dB , $t=26.39\text{ s}$;去自谱算法的最大旁瓣级为 -11.10 dB , $t=21.05\text{ s}$ 。由图 4 可知,迭代次数越多,GIB 算法的定位效果越好,但是计算程度相对复杂,两种算法中,GIB 算法能更有效地抑制最大旁瓣级,对单个点声源有更好的定位效果。

图 5、6 为 GIB 算法和去自谱算法对扩展性声源的定位效果,在同一直线上排列 5 个单极子点源,各个点声源间的距离为 14 cm ,整个阵列的长度 56 cm ,GIB 的迭代次数 $k=43$,图 5 中阵列面与声源面间距为 1 m ,图 6 中阵列面与声源面间距 0.5 m 。

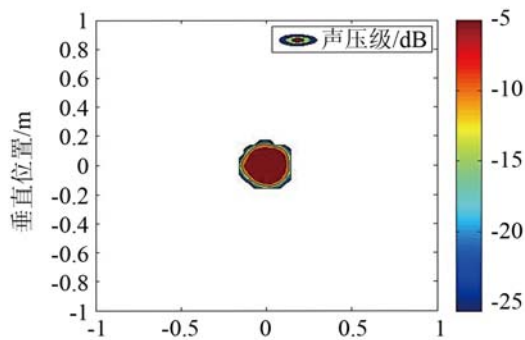
图 5 与图 6 显示了不同阵列面与声源面间距下两种算法对扩展性声源的定位效果。由图 5 可知,当阵列面远离声源表面时,去自谱算法已失效,GIB 算法能辨别出声源的大概位置,但不能将声源准确的估计出,分辨精度不高。在图 6 中阵列面越靠近声源面,定位效果越佳,当距离为 0.5 m 时,两种算法均能准确分辨出扩展性声源,去自谱算法定位所需时间 $t=21.96\text{ s}$,GIB 算法所需时间 $t=19.67\text{ s}$,GIB 算法计算时间相对较短且定位精度相对更好,更具有实时性。



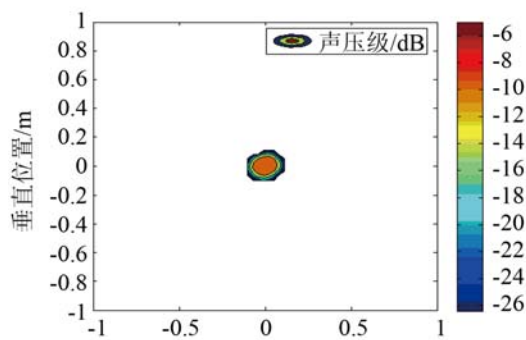
(a) $z=2\text{ m}$



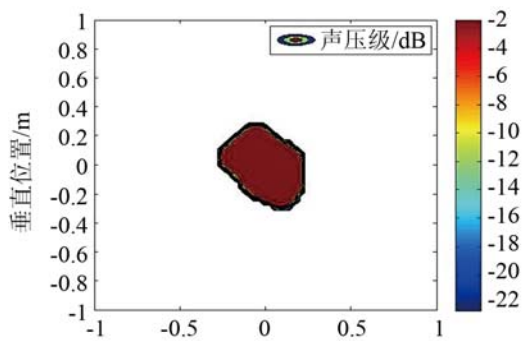
(a) GIB 算法 $k=43$



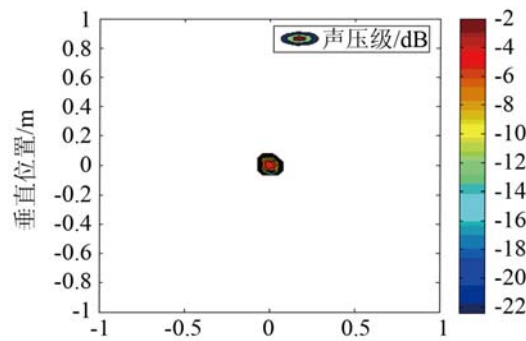
(b) $z=10\text{ m}$



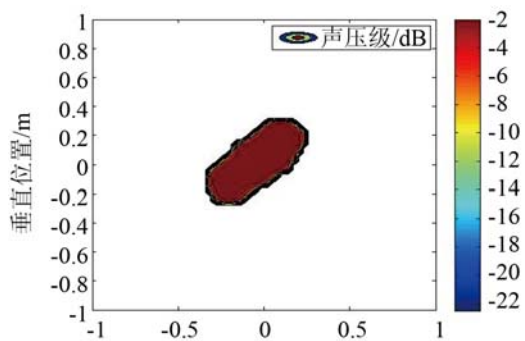
(b) GIB 算法 $k=50$



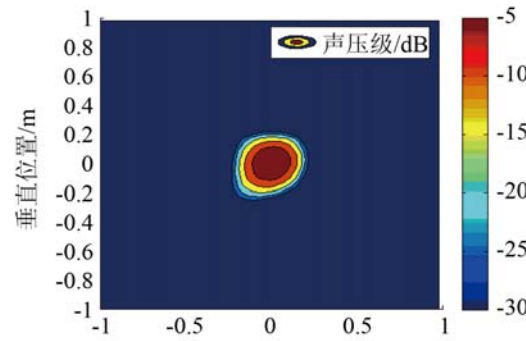
(c) $z=50\text{ m}$



(c) GIB 算法 $k=60$



(d) $z=100\text{ m}$



(d) 去自谱算法

图 3 不同测量距离 GIB 算法的定位效果

Fig.3 Identification of sources based on GIB algorithm under different measuring distances

图 4 GIB 和去自谱算法对单个点声源的定位效果

Fig.4 Identification of a single point source based on the GIB algorithm or the exclusion of autospectra algorithm

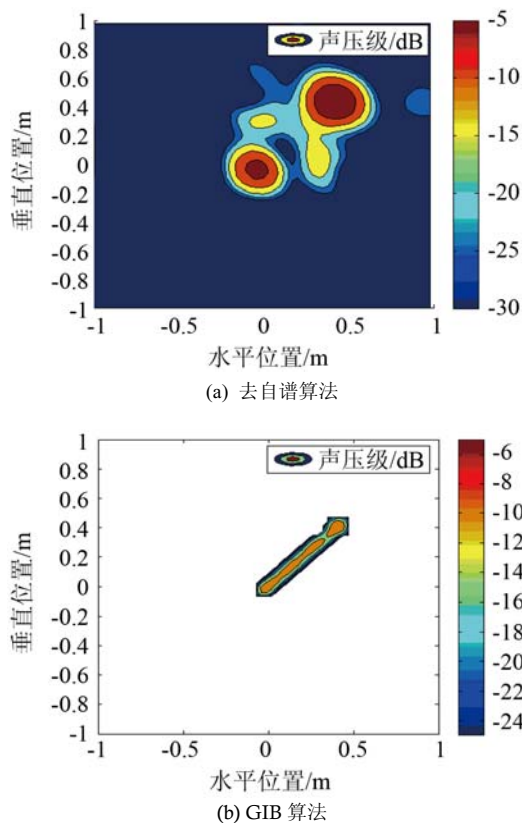


图 5 扩展性声源定位效果(阵列面与声源面间距为 1 m)

Fig.5 The identification of extended sources (The distance between microphone array and sources plane is 1 m)

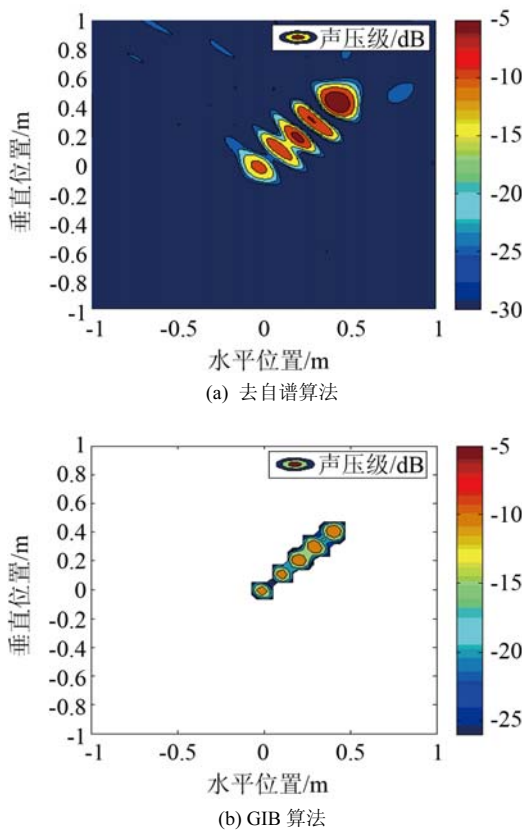


图 6 扩展性声源定位效果(阵列面与声源面间距为 0.5 m)

Fig.6 The identification of extended sources (The distance between microphone array and sources plane is 0.5 m)

3 结 论

针对噪声源辐射特性,引进了基于传声器阵列的广义逆波束形成算法对扩展性声源定位的影响因素进行仿真研究。GIB 算法结合广义逆原理和波束形成技术,根据传递函数矩阵 H 逆向求解目标域内源向量的声压分布,运用迭代法,减弱了声源旁瓣对声成像图的影响,可以把旁瓣掩盖下的弱声源检测出来,提高了定位的准确性。计算机仿真结果显示 GIB 算法能有效衰减旁瓣,能有效抑制背景噪声,但受测量距离影响较大,阵元数对声源定位效果影响不大,可以使信号接收阵列所需要的阵元数目大幅度降低,且 GIB 算法能够识别出声源平面内的单极子点源和扩展性声源(5 个紧密相连的单极子点源),并具有较好的定位效果,为实现识别主要噪声源提供了理论支持。

参 考 文 献

- [1] DANIEL B, GEORGES E. Level estimation of extended acoustic sources using an array of microphones[C]// AIAA-2003-3199, 2003.
- [2] TALOTTE C, GAUTIER P E, THOMPSON D J, et al. Identification, modeling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, **267**(3): 447-468.
- [3] BOON M, KINNEGING N, DOOL T V D. Two-dimensional noise source imaging with T-shaped microphone cross array[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, **108**(6): 2884-2890.
- [4] WANG Q, WANG X W, PAN X. Adaptive sonar beamformer based on inverse QR decomposition and recursive least squares filter for underwater target detection[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, **33**(13): 3987-3998.
- [5] 张金圈, 毕传兴, 陈心昭. Beamforming 方法的阵列研究及其在噪声源识别中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2009, **29**(3): 54-58. ZHANG Jinqun, BI Chuanxing, CHEN Xinzha. Study on array pattern and its application in noise source identification using beamforming method[J]. Noise and Vibration Control, 2009, **29**(3): 54-58.
- [6] 张海滨, 万泉, 蒋伟康. 城市高架轨道交通噪声辐射预测与实验研究[J]. 振动与冲击, 2010, **29**(11): 83-86. ZHANG Haibin, WAN Quan, JIANG Weikang. Predicting train noise radiation on elevated viaduct and its application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, **29**(11): 83-86.
- [7] DIANG Y, ZITENG W, BLING L, et al. Quantitative measurement of pass-by noise radiated by vehicles running at high speeds [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, **330**(7): 1352-1364.
- [8] PALLAS M A, LELONG J, CHATAGNON R. Characterisation of tran noise emission and contribution of the noise sources[J]. Applied Acoustics, 2011, **72**: 437-450.
- [9] SUZUKI T K. Generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/ incoherent, distributed and multipole sources[C]// 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics: 2008, AIAA-2008-2954.

- [10] 杨洋, 褚志刚, 倪计民, 等. 除自谱的互谱矩阵波束形成的噪声源识别技术[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 145-148.
YANG Yang, CHU Zhigang, NI Jimin, et al. Research on algorithm of sound source identification based on cross-spectral beamforming with exclusion of autospectra[J]. Noise and Vibration Control, 2011, (4): 145-148.
- [11] 陈永林. 广义逆矩阵的理论与方法[M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2005.
CHEN Yonglin. The theory and method of generalized inverse matrix[M]. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 2005.

《人工听觉—新视野》出版发行

“十二五”国家重点图书出版规划项目现代声学科学与技术丛书之一的《人工听觉—新视野》于2015年7月初正式翻译出版。本书是2011年Springer出版的“听觉研究手册系列”丛书的一卷 Auditory Prostheses New Horizons 的中文版, 由中国科学院声学研究所东海研究站仿生耳与声音技术实验室组织翻译、科学出版社出版发行。原书邀请了全世界30多位专家, 全面总结了人工听觉发展的各个方向, 介绍最新的研究进展。本书共15章, 主要内容包括听觉神经假体的发展、双侧人工耳蜗、声听觉与电听觉的结合、适用于传导性和感音神经性听力损伤的植入式听力设备、前庭植入系统、光刺激听神经、贯穿听神经式电极阵列、耳蜗神经核听觉假体、中脑听觉植入系统、CI植入后中枢听觉系统的发展和适应、CI植入者的听觉训练、小儿人工耳蜗植入者口头及书面交流的发展、音乐感知、声调语言与人工耳蜗、CI植入者的多感觉处理等。书末附彩图以便查阅。

原书编著者之一曾凡钢(Fan-Gang Zeng)教授, 现任美国加州大学尔湾分校耳鼻喉-头颈外科学系研究主任, 听觉与语音研究室主任, 并兼任解剖与神经生理学、生物医学工程、认知科学和耳鼻喉四个系的终身教授。曾教授在神经康复、听觉感知和语音处理的研究领域享有很高的国际声望, 已在该领域有众多成果。

译者中平利川和孟庆林博士师从冯海泓教授, 在仿生耳与声音技术实验室完成博士论文研究工作, 现分别在美国诺尔康研发中心和深圳大学工作。

仿生耳与声音技术实验室(Bionic Ear and Sound Technology Laboratory, BEST-Lab)主要专注于听觉感知与补偿技术和音频信号处理技术, 承担了“多道电子耳蜗的国产化研发及辅助设备配套研制”国家科技支撑计划重点项目和2项国家自然科学基金项目等。在中国科学院上海临床研究中心建有“听力与言语医学中心”。

