文章编号:1000-8055(2021)01-0193-12 doi:10.13224/j.cnki.jasp.2021.01.022

高级波束成形在旋转声源定位中的应用

周 纬[1,4],鲍 欢[1,4],杨明绥[2],马 威[3,4]
(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240;
2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所,沈阳 110015;
3. 上海交通大学 航空航天学院,上海 200240;
4. 上海交通大学 燃气轮机与民用航空发动机教育部工程研究中心,上海 200240)

摘 要:为了使高级波束成形中的函数波束成形、压缩感知波束成形、正交波束成形在旋转声源定位中获得广泛应用,对 3 种高级波束成形在旋转声源定位中的应用进行了研究,从声源空间分辨率,动态范围以及声源功率积分上与传统旋转波束成形和 DAMAS(deconvolution approach for the mapping of acoustic sources)反卷积作对比。仿真与实验结果表明:3 种高级波束成形均可以应用到旋转声源定位中,并且均能显著提升旋转声源空间分辨率和动态范围以及拥有较高的计算效率。函数波束成形在低频段的空间分辨率低于 DAMAS 并且容易产生较高的声源功率积分误差。压缩感知波束成形整体性能与 DAMAS 相近,并且在低频段的空间分辨率比 DAMAS 有优势。正交波束成形在低频段容易产生声源定位位置误差,抗干扰能力较弱,并且声源功率积分整体低于 DAMAS。

关 键 词:麦克风阵列;旋转声源定位;函数波束成形;压缩感知波束成形;正交波束成形
中图分类号:V211.71 **文献标志码**:A

Application of advanced beamforming in rotating sound source localization

ZHOU Wei[1,4], BAO Huan[1,4], YANG Mingsui[2], MA Wei[3,4]
(1. School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;
3. School of Aeronautics and Astronautics,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
4. Engineering Research Center of Gas Turbine and Civil Aero Engine,
Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Functional beamforming, compressive sensing beamforming, and orthogonal beamforming in advanced beamforming have not been widely used in rotating sound source localization. The applications of three above advanced beamforming in rotating sound source localization were studied, and compared with conventional rotating beamforming and decon-

收稿日期:2020-04-28
基金项目:国家科技重大专项(2017-Ⅱ-003-0015)
作者简介:周纬(1996—),男,硕士生,主要从事噪声测量研究。
通信作者:马威(1981—),男,副教授,博士,主要从事气动噪声测量研究。E-mail:mawei@sjtu.edu.cn

引用格式:周纬,鲍欢,杨明绥,等.高级波束成形在旋转声源定位中的应用[J].航空动力学报,2021,36(1):193-204. ZHOU Wei, BAO Huan, YANG Mingsui, et al. Application of advanced beamforming in rotating sound source localization[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(1): 193-204.

volution approach in terms of the spatial resolution, dynamic range and source power integration for the mapping of acoustic sources (DAMAS). The simulation and experiment results showed that the three advanced beamforming can be applied to the rotating sound source localization successfully, and also can significantly improve the spatial resolution and dynamic range of the rotating sound source with higher computation efficiency. The functional beamforming had a lower spatial resolution than DAMAS in the low frequency band and was prone to high source power integration error. The performance of compressive sensing beamforming was closest to DAMAS, and the spatial resolution in the low frequency band was better than DAMAS. Orthogonal beamforming was prone to generate sound source localization position error within the low frequency range, the ability of anti-interference was weak, and source power integration was lower than DAMAS.

Key words: microphone array; rotating sound source localization; functional beamforming; compressive sensing beamforming; orthogonal beamforming

自由场下旋转气动噪声污染问题日益受到人们的关注,尤其是高强度的螺旋桨旋转噪声和风力发电机叶片噪声,降低气动旋转噪声可避免声疲劳发生提高旋转机械使用寿命增强旋转机械运行可靠性以及改善操作人员的作业环境。基于麦克风阵列测试技术下的旋转波束成形能够高效识别出噪声源的位置分布及其对应的强度水平,因此可以有效协助旋转机械降噪设计[1]。

基于延迟叠加原理的传统波束成形能够出色完成静止噪声源定位,并且具有较高鲁棒性和计算效率[2],但在低频段其主瓣宽度较大空间分辨率较低,高频段易产生混叠旁瓣抑制能力弱动态范围差。为了克服这些缺点,各种后处理反卷积算法应运而生,其中 DAMAS(deconvolution approach for the mapping of acoustic sources)[3] 与 CLEAN-SC (CLEAN based on spatial source coherence)[4] 最为著名,极大提高了声源的空间分辨率和动态范围。然而反卷积算法处理时往往需要增加一些额外的前提假设,这些额外的假设往往会增加计算结果的不确定度,此外 DAMAS 在大量网格工况下计算效率较低。为了规避这些不足,学术界又相继提出一些高级波束成形算法,其中典型有函数波束成形(FB)[5]、压缩感知波束成形(CSB)[6-8]以及正交波束成形(OB)[9],这 3 种高级波束成形在静止声源定位中不仅计算效率较高而且具有与反卷积算法相媲美的空间分辨率和动态范围。

对于旋转噪声源,由于旋转运动而产生的多普勒效应无法直接通过延迟叠加法进行去除,因此声源空间分辨率低,动态范围差,易产生显著的拖尾效应。旋转波束成形可有效克服这些缺点。总体而言,传统旋转波束成形(CB)算法主要分为时域算法[10-12]和频域算法[13-15],两者相比较而言时域算法计算效率低,空间分辨率低,需要高频采样;频域算法由于计算过程中涉及交叉互谱矩阵计算,因此便于与反卷积算法相结合进一步提高空间分辨率和动态范围。然而广泛应用于静止声源定位的高级波束成形却鲜有应用到旋转声源定位中。值得注意的是在频域旋转波束成形中,在进行运动补偿和介质补偿后的旋转声源其实可以等效为静止声源进行声源定位,因此高级波束成形理论上是可以耦合到旋转声源定位中。然而要将高级波束成形成熟应用到旋转声源定位中还有 3 个问题需要解决:第一,理论上能应用,实际实验中是否也能应用? 第二,3 种高级波束成形应用到旋转声源定位中能否保留静止声源定位的优势? 第三,3 种高级波束成形计算结果与 DAMAS 反卷积相比具有哪些特点?

本文将针对以上 3 个问题开展研究,本文的研究方法主要采用数值仿真和实验验证与测量。本文布局为,首先梳理出 3 种高级波束成形耦合到旋转声源定位中的理论基础,然后设计双点源仿真研究,最后进行实验验证与测量。本研究可为工程界自由场下旋转噪声源定位提供更多算法的选择空间和参考。

1 理论介绍

1.1 传统旋转波束成形算法

传统旋转波束成形[13]采用模态分解法计算旋转坐标系下声压完成运动补偿和采用级数展开

法计算传播矢量和导向矢量完成介质补偿,图 1 为其原理图。

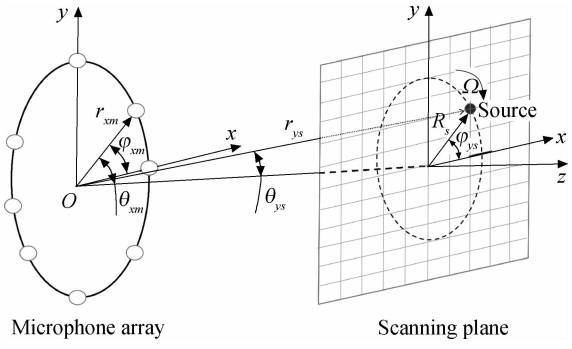


图 1　旋转波束成形原理图

Fig. 1　Rotating beamforming schematic

假设以麦克风中心为原点,麦克风的球坐标矢量为 $\boldsymbol{x}_m=(r_{xm},\varphi_{xm},\theta_{xm})$,$m=1,2,3,\cdots,M$,麦克风总数为 M,扫描平面中的网格点的球坐标矢量为 $\boldsymbol{y}_s=(r_{ys},\varphi_{ys},\theta_{ys})$,$s=1,2,3,\cdots,S$,网格点总数为 S,声源频率为 f,声源角频率 $\omega=2\pi f$,声源旋转角频率为 Ω,声源旋转半径为 R_s,声速为 c,可采用模态分解的方法计算旋转坐标系下声压

$$p_\Omega^m(\boldsymbol{x}_m,\omega)=\sum_{m_0=-M/2+1}^{M/2}p_{m_0}(\omega+m_0\Omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}m_0\varphi_{xm}} \tag{1}$$

其中 $\mathrm{i}=\sqrt{-1}$,旋转模态系数为

$$p_{m_0}(\omega+m_0\Omega)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}p(x_m,\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}m_0\varphi_{xm}} \tag{2}$$

根据奈奎斯特采样定理周向模态阶数 m_0 取值

$$\frac{-M}{2}+1\leqslant m_0\leqslant\frac{M}{2} \tag{3}$$

计算交叉互谱矩阵

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{p}_\Omega(\boldsymbol{p}_\Omega)^{\mathrm{H}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{p}_\Omega=[p_\Omega^1,\cdots,p_\Omega^m,\cdots,p_\Omega^M]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

其中上标 H 表示共轭转置,T 表示转置计算导向矢量矩阵

$$\boldsymbol{W}(s)=[W(1,s)\ \cdots\ W(m,s)\ \cdots\ W(M,s)]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中

$$W(m,s)=\frac{1}{\sqrt{M}}\cdot\frac{a(m,s)}{\sqrt{\boldsymbol{a}(s)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(s)}} \tag{7}$$

当交叉互谱矩阵去除对角线来抑制不相干噪声干扰时[16]

$$\boldsymbol{W}_\Omega^{\mathrm{s}}=\frac{\boldsymbol{G}_\Omega^{\mathrm{s}}}{\sqrt{\sum_{z_1,z_2\in U}|G_\Omega(z_1,s)|^2|G_\Omega(z_2,s)|^2}} \tag{8}$$

集合 $U=\{(z_1,z_2)\mid 1\leqslant z_1\leqslant M,1\leqslant z_2\leqslant M,z_1\neq z_2\}$

$$\boldsymbol{a}(s)=[a(1,s)\ \cdots\ a(m,s)\ \cdots\ a(M,s)]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

$$a(m,s)=\frac{G_\Omega(m,s)}{G_\Omega(O,s)} \tag{10}$$

$$G_\Omega(O,s)=\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k\bar{d}_{s,o}}}{4\pi\bar{d}_{s,o}} \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{a}$ 为列向量,表示导向矢量的第 s 列,k 为波数,$\bar{d}_{s,o}$ 表示 s 号网格点到麦克风阵列中心距离。

$$\boldsymbol{G}_\Omega^{\mathrm{s}}=[G_\Omega(1,s),\cdots,G_\Omega(m,s),\cdots,G_\Omega(M,s)]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中 $G_\Omega(m,s)$ 为自由场中旋转坐标系下的声传播格林函数,表达式为

$$G_\Omega(m,s)=-\mathrm{i}\sum_{m_0=-\infty}^{+\infty}\mathrm{e}^{\mathrm{i}m_0(\varphi_{xm}-\varphi_{ys})}k_{m_0}\sum_{n=|m_0|}^{+\infty}N_{m_0n}^2b_n\cdots(k_{m_0},r_{xm},r_{ys})P_n^{m_0}[\cos(\theta_{xm})]P_n^{m_0}[\cos(\theta_{ys})] \tag{13}$$

其中归一化因子

$$N_{m_0n}=\sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}\cdot\frac{(n-m_0)!}{(n+m_0)!}} \tag{14}$$

旋转效应造成频移后的波数为

$$k_{m_0}=\frac{2\pi f+m_0\Omega}{c} \tag{15}$$

$p_n^{m_0}(\cdot)$ 为 n 阶 m_0 次第一类勒让德函数

$$b_n(k_{m_0},r_{xm},r_{ys})=\begin{cases}\mathrm{j}_n(k_{m_0}r_{ys})h_n^{(\delta_{\mathrm{m}_0})}(k_{m_0}r_{xm}) & r_{ys}\leqslant r_{xm}\\ \mathrm{j}_n(k_{m_0}r_{xm})h_n^{(\delta_{\mathrm{m}_0})}(k_{m_0}r_{ys}) & r_{ys}>r_{xm}\end{cases} \tag{16}$$

其中 $\mathrm{j}_n(\cdot)$ 是 n 阶第一类球贝塞尔函数,$h_n^{(\delta_{\mathrm{m}_0})}$ 是第 δ_{m_0} 类球汉克尔函数

$$\delta_{m_0}=\begin{cases}2 & k_{m_0}\geqslant 0\\ 1 & k_{m_0}<0\end{cases} \tag{17}$$

其中式(10)中无穷级数展开项数范围,在满足较小的截断误差下,可近似取为 $m_0\in[m_{\mathrm{l}},m_{\mathrm{u}}]$,$n\in[|m_0|,n_{\max}]$[17-18],其中

$$m_{\mathrm{l}}=\frac{-k_0R_s}{1+k_{m_0}R_s} \tag{18}$$

$$m_{\mathrm{u}}=\frac{k_0R_s}{1-k_{m_0}R_s} \tag{19}$$

$$k_0=\frac{2\pi f}{c} \tag{20}$$

$$n_{\max}=\max(\lfloor|k_0+m_0k_{m_0}|R_s\rfloor,|m_0|) \tag{21}$$

式中 R 表示声源旋转半径,$\lfloor\cdot\rfloor$ 表示下取整运算。

根据传统波数成形算法可得传统旋转波束成形结果

$$b_{\mathrm{cb}}(\boldsymbol{y}_s)=(\boldsymbol{W}_\Omega^s)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{W}_\Omega^s \tag{22}$$

1.2 高级波束成形算法

高级波束成形相比较传统波束成形具有较高分辨率和动态范围，当旋转声源测得的声压去除多普勒效应以及导向矢量完成介质补偿后，就可以将其等效为静止声源，因此可以使用广泛应用于静止声源定位的高级波束成形进行旋转声源定位和声源功率计算。

1.2.1 函数波束形成

函数波束成形利用旁瓣的指数衰减比真实声源快的特点，大幅抑制旁瓣产生，进而提升动态范围和改善空间分辨率[5,19]，算法表达式为

$$b_{\mathrm{fb}}(\boldsymbol{y}_s)=\frac{(\boldsymbol{h}_s^{\mathrm{H}}\boldsymbol{C}_{1/v}\boldsymbol{h}_s)^v}{\|\boldsymbol{G}_\Omega^s\|_2^2} \tag{23}$$

其中 $\boldsymbol{h}_s=\dfrac{\boldsymbol{G}_\Omega^s}{\|\boldsymbol{G}_\Omega^s\|_2}$ 为归一化的格林函数

$$\boldsymbol{C}_{1/v}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}^{1/v}\boldsymbol{U}^{\mathrm{H}} \tag{24}$$

式中 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 分别为交叉互谱矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的特征值分解获得的特征向量矩阵和特征值矩阵，v 为指数参数，当 $v=1$ 时函数波束成形退化为传统波束成形。在一定范围内，随着 v 的取值增大声源定位结果的动态范围越好，推荐 $v=20$ 时可以满足绝大多数测量需求[20]。

1.2.2 压缩感知波束成形

在欠采样条件下，可以利用压缩感知技术重构出稀疏信号。因此假设扫描平面上存在的声源数相对于所有网格点数是稀疏的，因此可以利用有限的测量点信息重构出扫描平面上的声源分布[7]。具体算法如下：

$$\boldsymbol{p}_\Omega=\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}+\boldsymbol{p}_{\mathrm{n}}=\boldsymbol{G}_\Omega\boldsymbol{q}+\boldsymbol{p}_{\mathrm{n}} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{G}_\Omega=[\boldsymbol{G}_\Omega^1,\cdots,\boldsymbol{G}_\Omega^s,\cdots,\boldsymbol{G}_\Omega^S] \tag{26}$$

其中 $\boldsymbol{q}\in\mathbb{C}^{S\times1}$ 表示网格点上的声压分布，$\boldsymbol{p}_s\in\mathbb{C}^{M\times1}$ 表示理想纯信号，$\boldsymbol{p}_{\mathrm{n}}\in\mathbb{C}^{M\times1}$ 表示不相干的干扰噪声，已知旋转坐标系下的测量点声压分布 $\boldsymbol{p}_\Omega$ 可利用压缩感知算法求解出 $\boldsymbol{q}$，该求解过程可等效为 l_1 范数最小化的优化过程

$$\begin{aligned}&\operatorname{argmin}\|\boldsymbol{q}\|_1,\\&\text{subject to }\|\boldsymbol{p}_\Omega-\boldsymbol{G}_\Omega\boldsymbol{q}\|_2\leqslant\delta,\ \delta>0\end{aligned} \tag{27}$$

$$\alpha=20\log_{10}\frac{\|\boldsymbol{p}_s\|_2}{\|\boldsymbol{p}_n\|_2} \tag{28}$$

$$\delta\geqslant10^{-\frac{\alpha}{20}}\|\boldsymbol{p}_s\|_2 \tag{29}$$

实验时 δ 可根据预估的信噪比 α 进行经验选取，在实验中可选用抗干扰能力较强的协方差压缩感知技术[6]。求解过程可借助嵌入在 MATLAB (matrix laboratory)软件的凸优化工具包。

1.2.3 正交波束成形

正交波束成形是根据声源信号子空间的特征值和特征向量与声源强度和声源位置相关联这一事实提出的[9]。首先对交叉互谱矩阵进行特征值分解

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{U}^{\mathrm{H}} \tag{30}$$

在无噪声干扰情况下，$\boldsymbol{\Sigma}$ 中所包含的特征值 Σ_{jj} 的个数即为声源的个数，因此在实际包含噪声环境中需要对真实声源个数进行预估，根据预估范围来选取有效特征值 Σ_{jj}，在复杂实验结果处理中选用了最大的前 20 个特征值，效果显著[9]；然后根据 Σ_{jj} 及其对应的特征向量 $\boldsymbol{u}_j$ 计算出由声源 j 所贡献的交叉谱矩阵 $\boldsymbol{C}_j$

$$\boldsymbol{C}_j=\boldsymbol{u}_j\Sigma_{jj}\boldsymbol{u}_j^{\mathrm{H}} \tag{31}$$

正交波束成形结果为

$$b_{\mathrm{ob}}^j(\boldsymbol{y}_s)=(\boldsymbol{W}_\Omega^s)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{C}_j\boldsymbol{W}_\Omega^s \tag{32}$$

由于式(32)计算出的波束成形结果实际上是由一个声源所贡献，因此其峰值对应的位置和强度即为该点源的实际位置和强度。那么对所有有效特征值都重复计算一遍，即可得到所有声源分布。

2 仿真计算

2.1 参数设置

为了研究高级波束成形在旋转声源定位中的性能。首先进行仿真研究，本文中的仿真声源是利用旋转坐标系下的格林函数合成的，这避免引入运动补偿算法产生的误差干扰。表 1 列出了详细参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值及范围
声源转速/(r/min)	1200
旋转半径/m	0.445
声源初始位置	(0,0.445) (0,−0.445)
声源声压幅值/Pa	1
测量距离/m	1
阵列孔径/m	0.8
麦克风个数	40
扫描网格总数	2601(51×51)
网格尺寸/m	0.02
信噪比/dB	20
波束成形动态范围/dB	20

续表

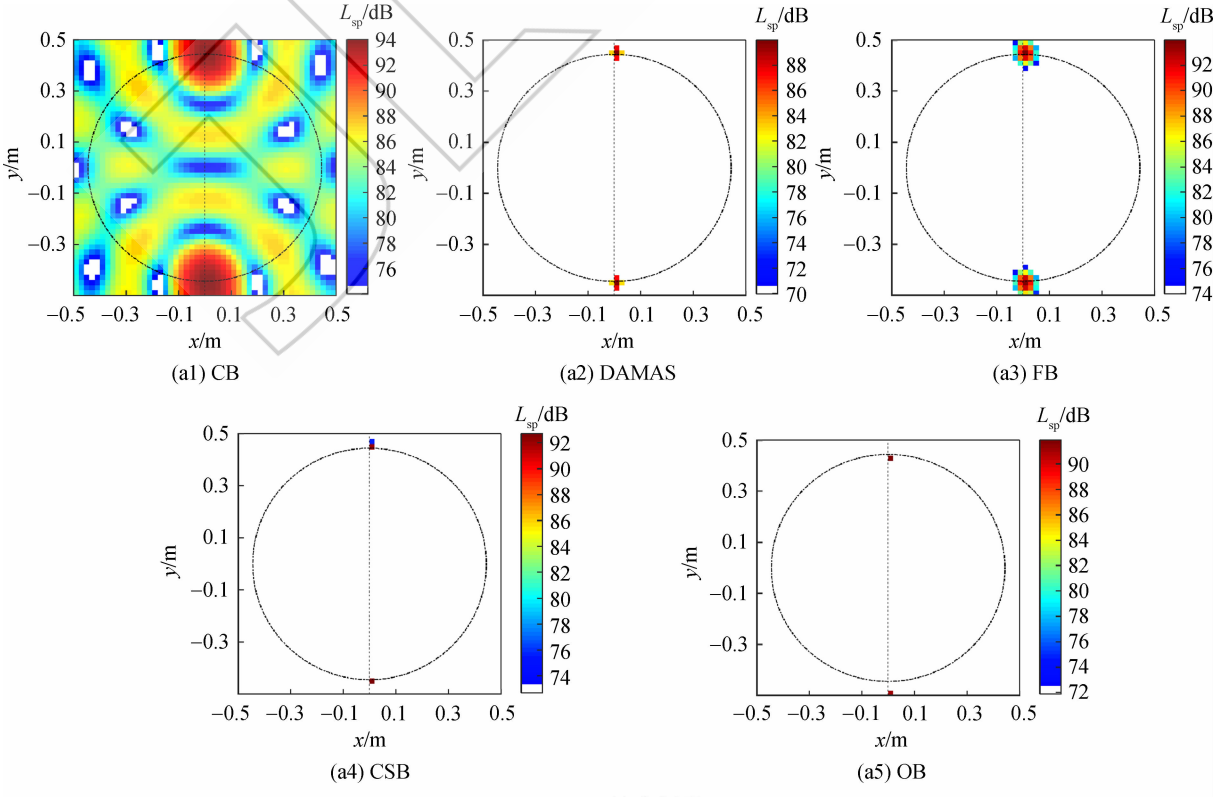
参数	数值及范围
空气声阻抗	439.62
DAMAS 迭代次数	2000
FB 指数参数 v	20
δ	0.08
OB 特征值选取	从大到小前 20

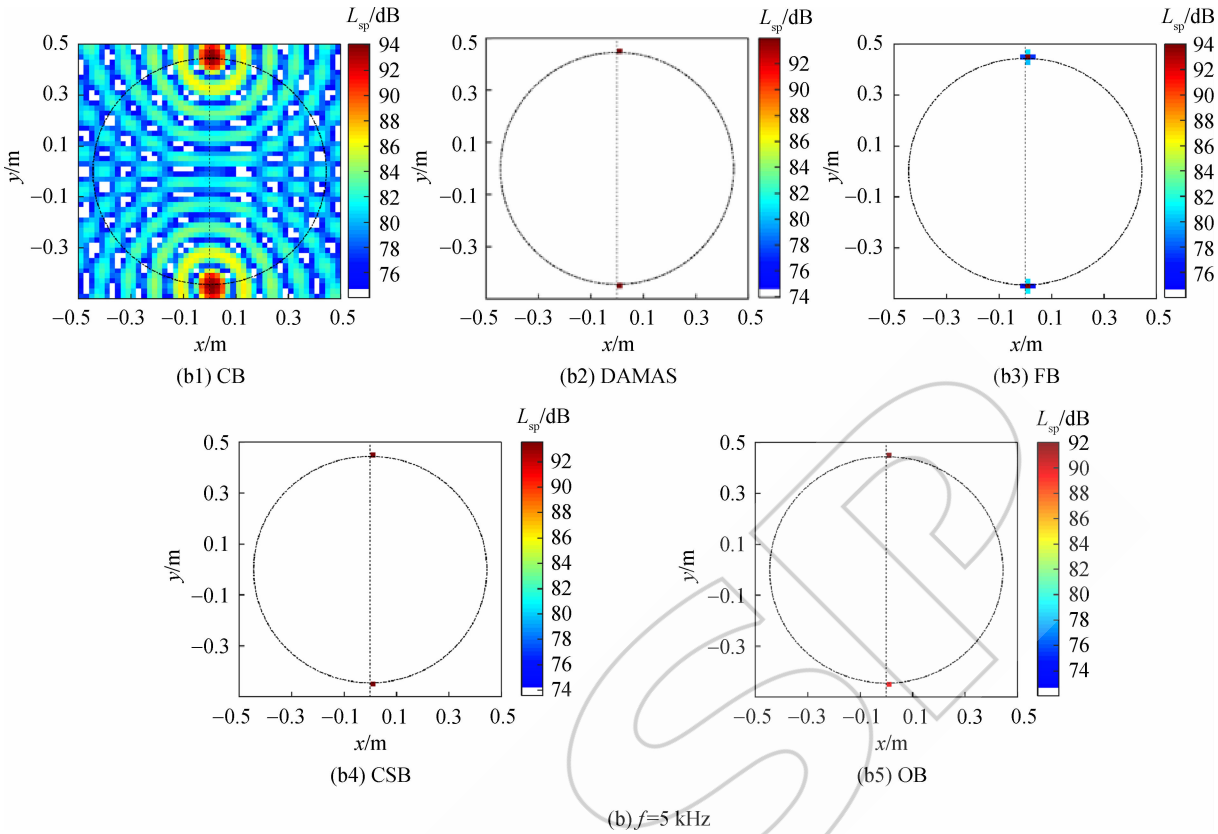
两不相干点源的初始位置分别设置在 6 点钟方向和 12 点钟方向,旋转方向为逆时针;考虑到背景噪声干扰,在纯单音信号中添加随机噪声,信噪比为 20 dB,最后将高级波束成形计算结果与 DAMAS 结果进行对比。因为波束成形输出结果为声源功率(source power)[16]分布,单位为 Pa^2,这将在定位云图中统一转化为声压级(SPL,量符号计为 L_{sp})来表征声源强度分布。

2.2　结果分析

图 2 给出了频率为 2、5、10 kHz 的旋转单音噪声源定位结果,图中黑色点划线圆弧表示声源运动轨迹,黑色中心虚线与圆弧交点即为声源的初始位置。图 2(a)表明,2 kHz 时,空间分辨率最高的是正交波束成形,但是其存在一定的定位位置误差。函数波束成形结果的动态范围提升显著,空间分辨率相比较 DAMAS 较低。压缩感知波束成形整体上与 DAMAS 结果最为接近。图2(b)表明,5 kHz 时,函数波束成形结果的主瓣宽度变窄空间分辨率有显著提升,但相比较 DAMAS 结果还是存在一定分辨率差距。压缩感知波束成形与 DAMAS 结果几乎一致;正交波束成形定位位置结果与 DAMAS 相吻合,但 6 点钟方向点源强度偏弱。图 2(c)表明,10 kHz 时,3 种高级波束成形的定位位置结果与 DAMAS 结果基本一致,但正交波束成形结果中 6 点钟方向的点源强度仍然偏弱。因此仿真结果表明,在中高频段旋转噪声源定位中,3 种高级波束成形均可显著提高声源空间分辨率和动态范围,提升水平可以与 DAMAS 相媲美。

由于波束成形算法具有一定不确定度,声源总能量在计算过程中可能会耗散在相邻网格点上。为了正确客观的评价 3 种高级波束成形对声源能量的估计精度,对以预设声源点位置为圆心,半径为 0.06 m 的圆域中的网格点所对应声源功率进行积分作为声源功率水平估计,并将最终声源功率积分(source power integration)值转换为声压级,该声源功率积分方法与参考文献[21]一致。并画出频率范围为 1～10.5 kHz 的声源功率积分曲线,如图 3 所示。该变化曲线是两点源的算术平均结果,图中的水平虚线标出了预设真实平均声源功率为 94 dB。从曲线上可知 DAMAS 结果与预设水平最为接近,即声源功率积分误差





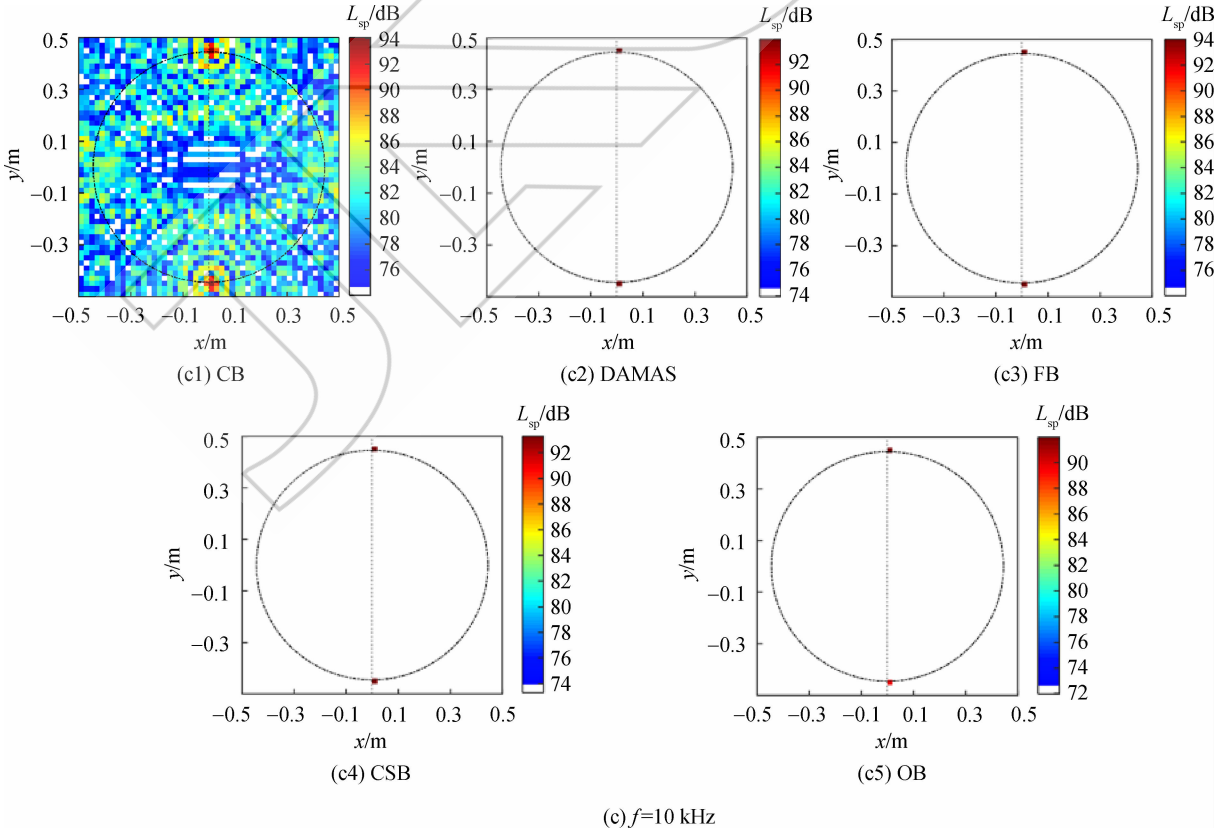


图 2 声源定位结果

Fig. 2 Source localization results

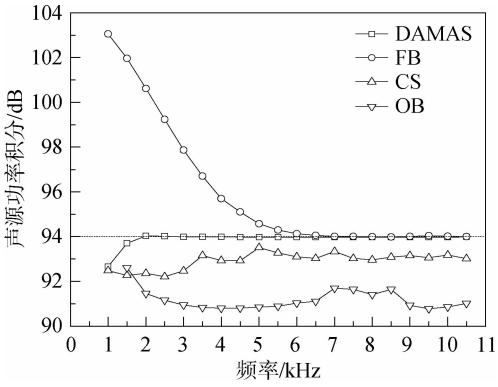


图 3　声源功率积分

Fig. 3　Source power integration

最小。在低频段函数波束成形声源功率积分误差较大,但随着频率升高误差逐渐减小直到与 DAMAS 相接近;压缩感知波束成形计算的声源功率积分不随频率发生显著变化,与预设水平相差在 0.8 dB 左右。正交波束成形计算的声源功率积分也不随频率发生显著变化,整体与预设水平相差在 3 dB 左右,值得注意的是当声源频率为 1 kHz,正交波束成形定位声源失败,因此在图中没有画出对应声源功率积分值。

图 4 给出了各算法在 1～10.5 kHz 的平均计算时间,纵坐标采用 10 为底对数坐标,运行程序计算机型号为 intel core i7-4790 主频 3.6 GHz,运行内存 8 GB。结果表明:在不运用加速算法下[22-24],DAMAS 的计算时间大约是高级波束成形计算时间的 20～2500 倍。当存在大量网格或者在三维旋转声源定位中,高级波束成形在计算效率上优势就会越发突出,特别对旋转声源定位,由于前面的运动补偿与介质补偿算法需要一定计算时间,如果定位算法太过耗时会加剧旋转声源定位过慢的缺陷。

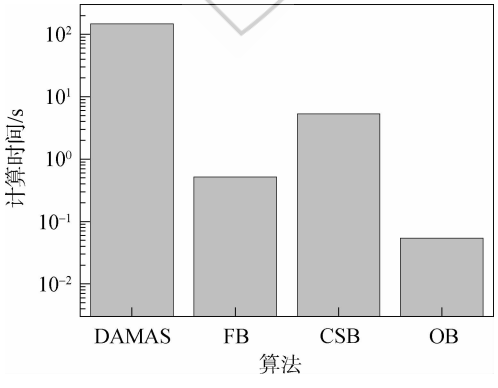


图 4　计算时间

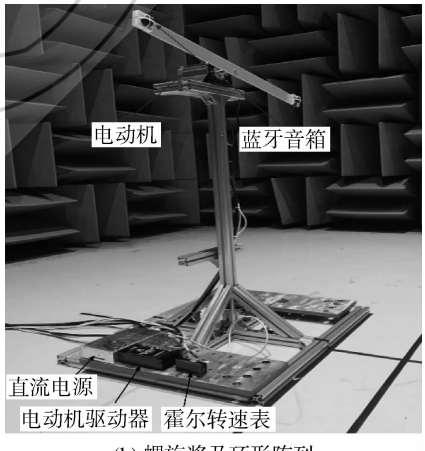
Fig. 4　Computation time

3　实验研究

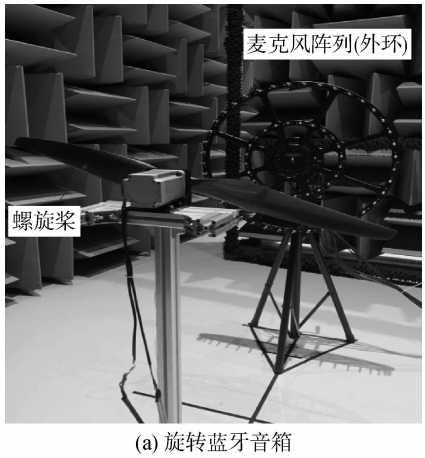
3.1　实验设备及参数介绍

如图 5 所示,整个实验是在半消声室环境下进行的。实验设备有蓝牙音箱、螺旋桨、500 W 直流电动机、电动机驱动器、霍尔转速表,电动机转速可由电动机驱动器精确控制。数据采集机箱型号为 NI PXIe-1082,采集板卡为 NI PXIe-4499。环形麦克风阵列由 40 个等间距麦克风组成,麦克风型号为 BK-4958。

本实验研究环节分为两部分,第一部分为验证实验,在长为 0.8 m、宽为 0.04 m 绝缘杆两端分别固定一个型号相同的蓝牙音箱,两音箱中心相距 0.76 m,并且可以发出白噪声信号,因此可以模拟两个单极子点声源,在电动机带动下以 1200 r/min逆时针旋转,如图 5(a)所示。第二部分为螺旋桨噪声定位测量实验。螺旋桨选用的是某农用无人机螺旋桨型号为 3510,螺旋桨长度为 0.89 m。在电动机带动下以 1200 r/min 逆时针旋



(b) 螺旋桨及环形阵列



(a) 旋转蓝牙音箱

图 5　实验装置

Fig. 5　Experimental setups

转，如图 5(b)所示。为了与仿真结果进行对照，实验中大部分参数与仿真保持相同，频谱计算方法采用 Welch 法[25]，具体参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters

参数	数值及范围
阵列孔径/m	0.8
麦克风个数	40
测量距离/m	1
转速/(r/min)	1200
采样频率/kHz	25.6
采样时间/s	15
傅里叶变换分块长度	1024
频率分辨率/Hz	25
重叠度/%	50
网格尺寸/m	0.02
网格总数	2601(51×51)
DAMAS 迭代次数	2000
FB 指数参数 v	20
OB 特征值选取	从大到小前 20

3.2 实验结果分析

3.2.1 双点源验证实验结果

图 6 给出了 5 kHz 下 2 个旋转音箱声源定位结果。图中黑色点划线圆弧给出了音箱旋转轨迹，为了消除不相干噪声干扰对交叉谱矩阵的对角元素进行去除。动态范围设置为 10 dB。验证结果表明 3 种高级波束成形均能识别出 2 个旋转的声源，并且定位结果在空间分辨率和动态范围上比传统旋转波束成形有显著优势。因此本文将 3 种高级波束成形应用到旋转声源定位中是可行的。在声源空间分辨率上，函数波束成形提升最少。正交波束成形提升最多“鬼源”最少，这些“鬼源”有可能是真实存在的噪声源，因为从布置实验件上看，蓝牙音箱固定底座是个小木块并且表面绑有扎带，这些物体在转动过程都会与气流相互作用产生新气动噪声源。压缩感知波束成形结果与 DAMAS 结果最为相近。

3.2.2 螺旋桨实验噪声测量结果

图 7 给出了实验测得螺旋桨加电动机总噪声信号与电动机单独以 1 200 r/min 运行时的噪声信号的功率谱密度分布图，电动机稳定运行时信号近似稳态信号，该图是 40 个麦克风测量的平均

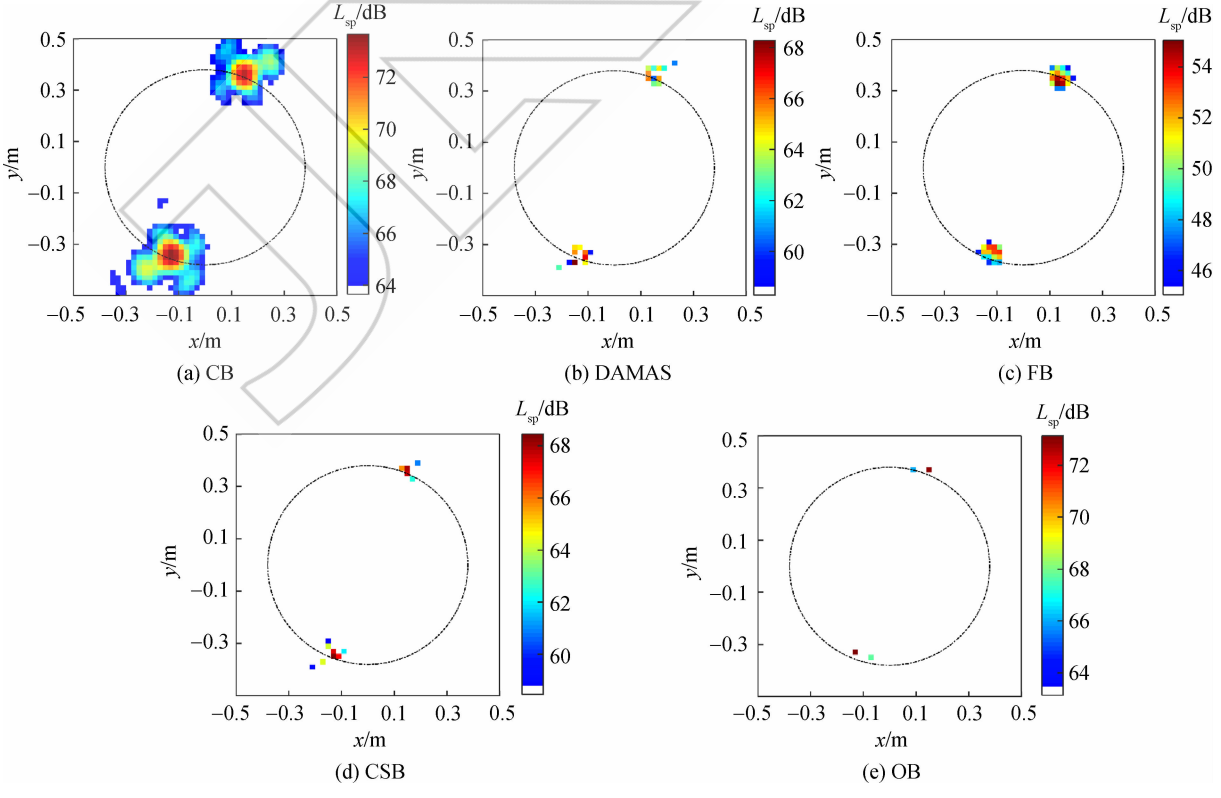


图 6 旋转蓝牙音箱声源定位结果

Fig. 6 Rotating bluetooth speaker sound source localization result

结果。整体上看电动机的噪声水平较低,螺旋桨噪声信号显著,且所测得噪声大部分为宽频噪声。为了对压缩感知波束成形中参数 δ 进行较好预估,需要预先估计信噪比。纯螺旋桨信号可由测得总噪声信号减去电动机噪声信号进行估计,据此可以估算出信噪比。由于压缩感知波束成形应用到旋转声源定位中需要将旋转声源等效为静止声源,因此该过程必须在旋转坐标系中完成。图 8 中给出了信噪比随频率变化曲线,平均信噪比(L_{sp})约为 38.67 dB,在图中用虚线标出。

图 9 分别给出了螺旋桨在 3 种频率下对应的噪声源定位结果,图中黑色点划线圆弧表示螺旋桨的运动轨迹,并且根据螺旋桨实际尺寸大致绘制出螺旋桨的叶片轮廓,通过调节分析的时域数据的起使时刻,使传统旋转波束成形的峰值与图中螺旋桨的中心虚线相交,便于各算法之间比较时判定噪声源的主要位置分布。对交叉谱矩阵的对角元素进行去除从而消除不相干噪声干扰,动态范围统一设置为 10 dB。总体来看,螺旋桨噪声源主要出现在叶尖部位。

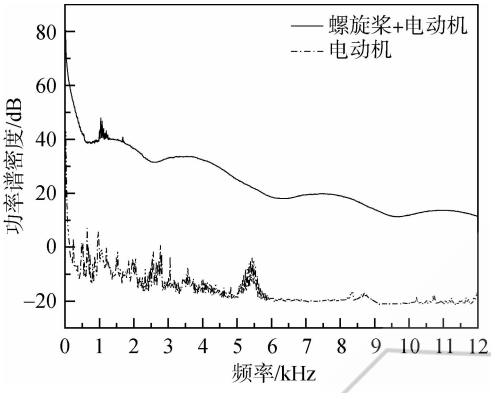


图 7　功率谱密度分布

Fig. 7　Power spectral density distribution

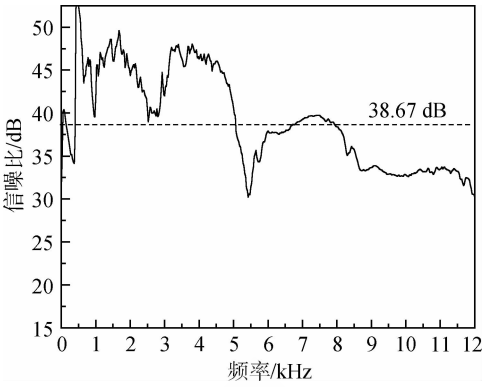
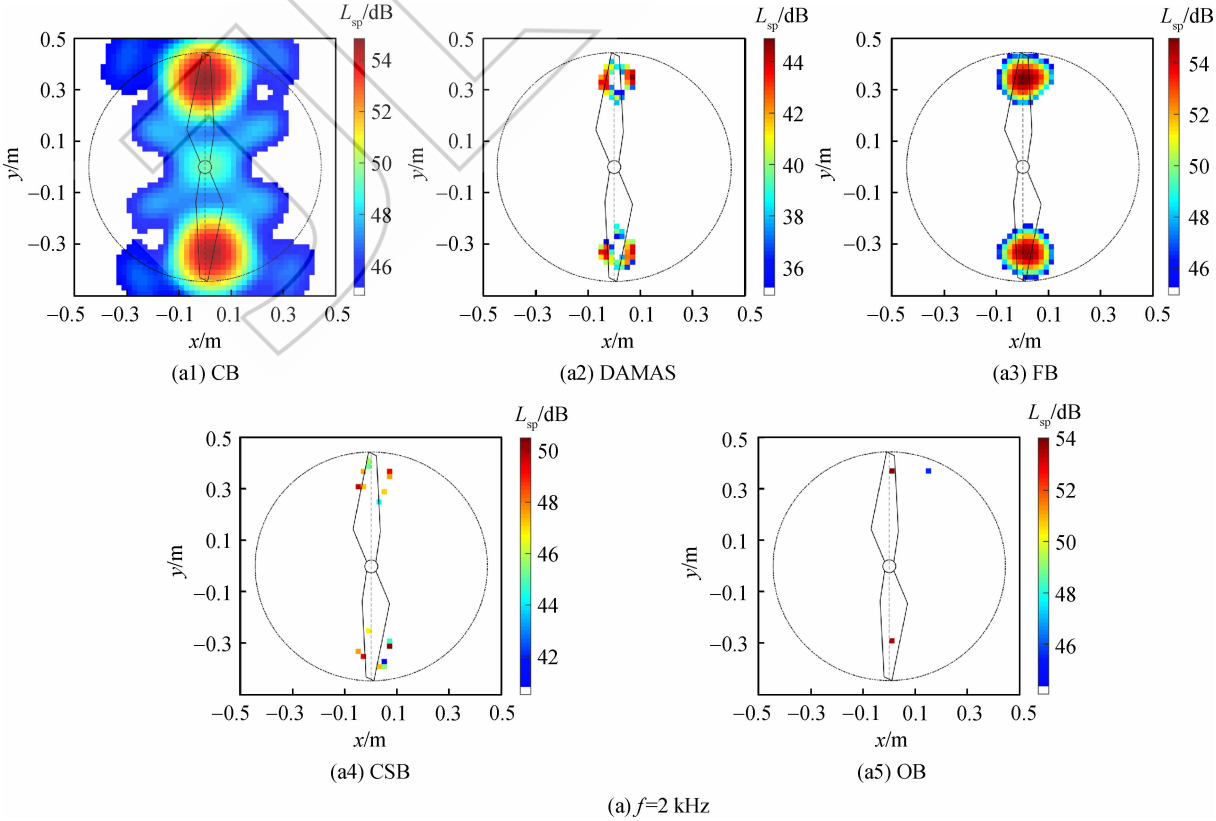


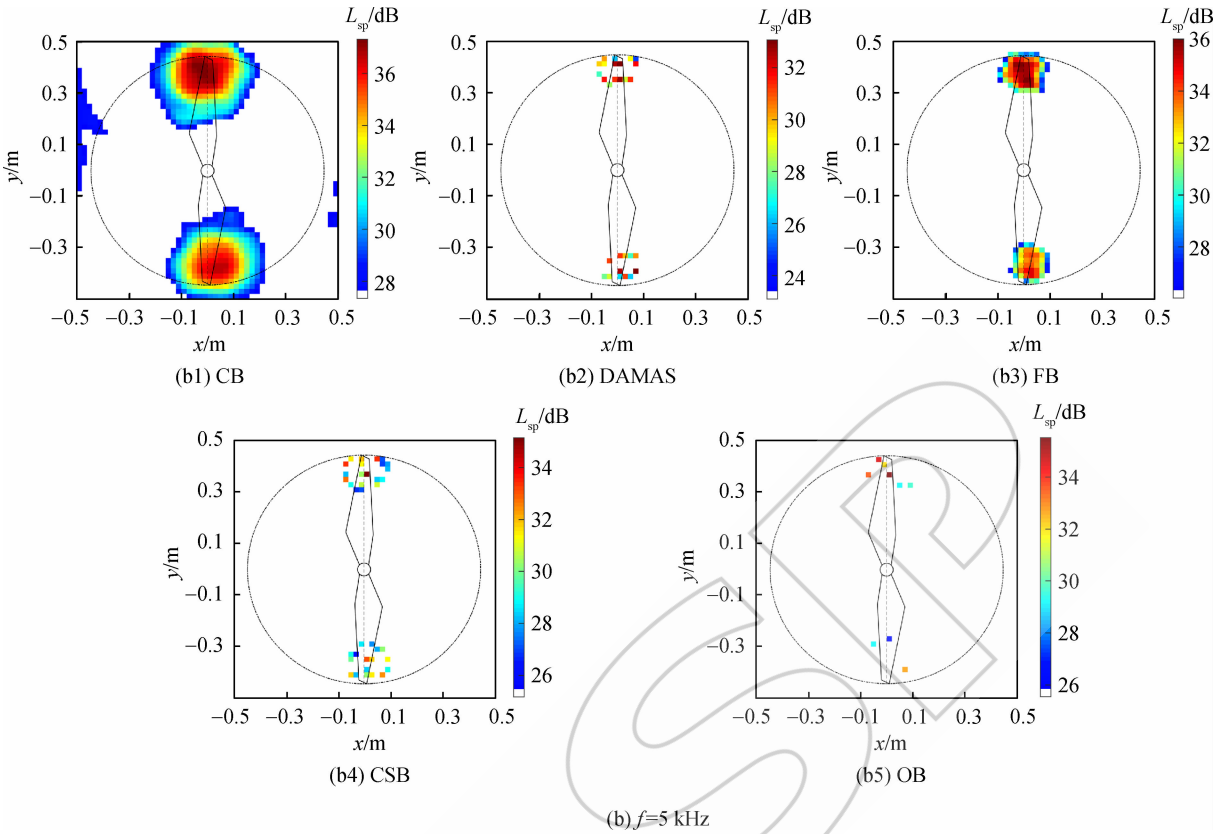
图 8　信噪比

Fig. 8　Signal to noise ratio

如图 9(a)所示,2 kHz 时,函数波束成形在动态范围上提升显著,但在声源空间分辨率上提升最小。压缩感知波束成形结果显示噪声源分布在叶尖的四周,结果与 DAMAS 相近,并且在空间分辨率上比 DAMAS 有显著优势。正交波束成



(a) f=2 kHz



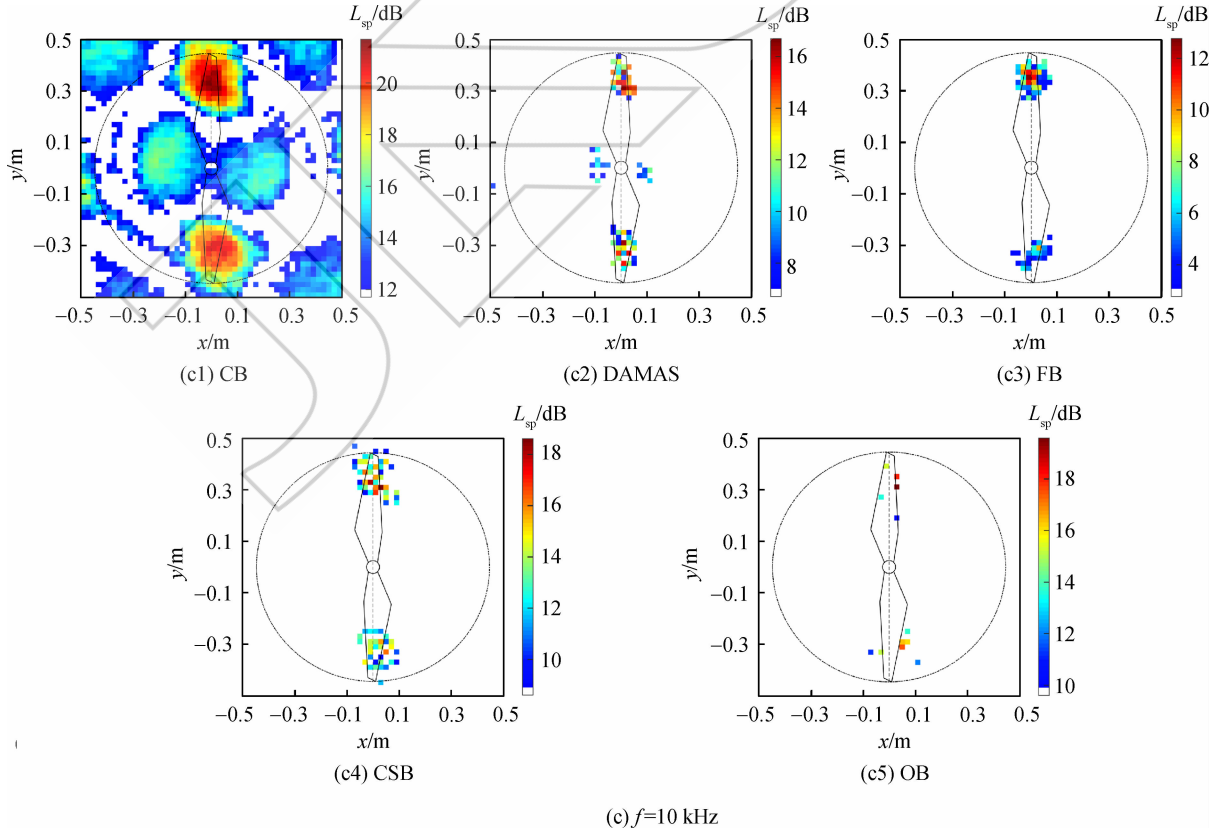


图 9 螺旋桨噪声定位结果

Fig. 9 Propeller noise localization result

形结果表明噪声源位于叶尖中心部位,这与传统旋转波束成形峰值位置相吻合。如图 9(b)所示,5 kHz 时,函数波束成形主瓣宽度减小、空间分辨率进一步提升,与 DAMAS 相比较噪声源分布较为集中;压缩感知波束成形与 DAMAS 结果在声源分布较为接近,但噪声源峰值比 DAMAS 高。正交波束成形结果表明噪声源集中在叶尖边缘,并且叶片上半部分噪声源弱于叶片下半部分,噪声源峰值与传统旋转波束成形相近。如图 9(c)所示,10 kHz 时,DAMAS 结果中,在叶片中部由于混叠效应出现了伪噪声源,而 3 种高级波束成形结果均未出现,抗干扰能力较强。函数波束成形空间分辨率显著提高,与压缩感知波束成形结果相近。正交波束成形结果中噪声源分布较为离散,并且大部分噪声源位于叶片区域以外。

由于螺旋桨噪声主要是由叶片与气流相互作用产生的是典型偶极子声源,因此有一定指向性,这与波束成形所用的不相干的各向均匀辐射的单极子声源模型有所差异,此外扫描区域网格点划分与实际噪声位置有偏差也会引起导向矢量的不匹配问题[26-27],这些都会恶化声源定位的空间分辨率以及产生声源定位位置误差,因此假设出现在叶尖区域附近的噪声源也是实际存在噪声源。因此对叶尖附近区域的噪声源功率进行积分[16],来评估螺旋桨噪声源的辐射总能量。图 10 给出螺旋桨叶片噪声源功率的积分区域示意图,积分区域为点划线所包围的矩形区域。图 11 给出了 DAMAS 反卷积与 3 种高级波束成形计算获得的声源功率积分曲线。总体上看,函数波束成形结果在低频段获得的声源功率积分偏高这与仿真结果相吻合,但是在高频段获得声源功率呈较大幅

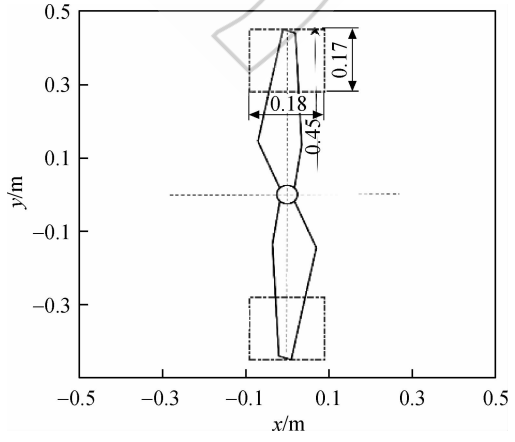


图 10　声源功率积分区域

Fig. 10　Source-power integration area

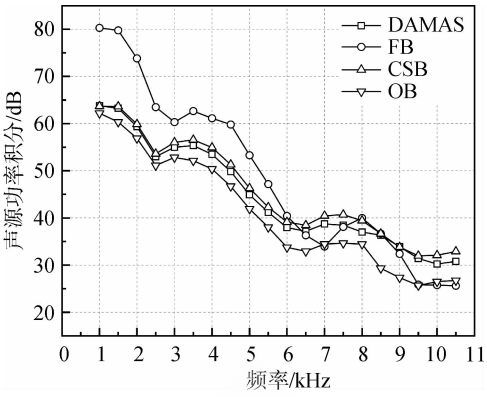


图 11　螺旋桨噪声源功率积分

Fig. 11　Propeller noise source power integration

度波动变化并且整体水平低于 DAMAS,这可能是物理模型与真实声源不匹配造成的;压缩感知波束成形获得的声源功率积分与 DAMAS 最为接近;正交波束成形获得声源功率积分整体比 DAMAS 低 3 dB 左右,并且随频率变化趋势与 DAMAS 一致。

4　结　论

本文详细研究了 3 种高级波束成形在旋转声源定位中的应用,并将其与传统旋转波束成形和 DAMAS 反卷积进行比较,得出以下结论:

1) 高级波束成形可以在实验中应用到旋转声源定位中。

2) 3 种高级波束成形都具有高于传统旋转波束成形的空间分辨率和动态范围以及拥有较高的计算效率,因此延续了静止声源定位中的优势。

3) 函数波束成形动态范围提升显著,并且空间分辨率随频率增大提升越显著,但在低频段空间分辨率上不如 DAMAS 反卷积,并且计算获得的声源功率积分误差最大;压缩感知波束成形在整体性能上与 DAMAS 最接近。实验结果表明,其在抗干扰能力以及低频段空间分辨率比 DAMAS 有优势,但缺点是在计算之前需要对背景干扰噪声有个较为准确的预估;正交波束成形计算效率最高,并且在所研究的频率范围内都具有很高的空间分辨率,但是在低频段容易产生定位位置误差,抗干扰能力较弱,此外在声源功率积分上也低于 DAMAS。

参考文献:

[1] HUMPHREYS J W, BROOKS T, HUNTER J W, et al. Design and use of microphone directional arrays for aeroacoustic measurements[R]. AIAA-98-0471, 1998.

[2] DOUGHTERTY R P. Beamforming in acoustic testing [M]. Berlin: Springer, 2002.

[3] BROOKS T F, HUMPHREYS W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4): 856-879.

[4] SIJTSMA P. CLEAN based on spatial source coherence [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2007, 6(4): 357-374.

[5] DOUGHERTY R P. Functional beamforming for aeroacoustic source distributions [R]. AIAA-2014-3066, 2014.

[6] ZHONG Siyang, WEI Qingkai, HUANG Xun. Compressive sensing beamforming based on covariance for acoustic imaging with noisy measurements [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5): 445-451.

[7] XENAKI A, GERSTOFT P, MOSEGAARD K. Compressive beamforming [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(1): 260-271.

[8] 宁方立, 张超, 潘峰, 等. 飞机起落架噪声源定位的压缩感知算法 [J]. 航空学报, 2018, 39(5): 81-91.
NING Fangli, ZHANG Chao, PAN Feng, et al. Compressive sensing algorithm for sound source location of aircraft landing gear [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 81-91. (in Chinese)

[9] SARRADJ E. A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(9): 1553-1569.

[10] SIJTSMA P, OERLEMANS S, HOLTHUSEN H. Location of rotating sources by phased array measurements [R]. AIAA-2001-2167, 2001.

[11] SIJTSMA P. Using phased array beamforming to identify broadband noise sources in a turbofan engine [J]. Noise Notes, 2011, 10(1): 39-52.

[12] MO Pingxi, JIANG Weikang. A hybrid deconvolution approach to separate static and moving single-tone acoustic sources by phased microphone array measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 84: 399-413.

[13] PANNERT W, MAIER C. Rotating beamforming-motion-compensation in the frequency domain and application of high-resolution beamforming algorithms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(7): 1899-1912.

[14] HEROLD G, SARRADJ E. Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans [J]. Noise Control Engineering Journal, 2015, 63(6): 546-551.

[15] OCKER C, PANNERT W. Imaging of broadband noise from rotating sources in uniform axial flow [J]. AIAA Journal, 2016, 55(4): 1185-1193.

[16] SIJTSMA P. Phased array beamforming applied to wind tunnel and fly-over tests [R]. SAE 2010-36-0514, 2010.

[17] POLETTI M A. Series expansions of rotating two and three dimensional sound fields [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(6): 3363-3374.

[18] POLETTI M A, TEAL P D. Comparison of methods for calculating the sound field due to a rotating monopole [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(6): 3513-3520.

[19] BARON V, FINEZ A, NICOLAS B. Numerical and experimental assessment of functional beamforming for source quantification [R]. BeBeC-2018-S08, 2018.

[20] DOUGHERTY R P. Determining spectra of aeroacoustic sources from microphone array data [R]. AIAA-2019-2745, 2019.

[21] HEROLD G, OCKER C, SARRADJ E, et al. A comparison of microphone array methods for the characterization of rotating sound sources [R]. Berlin Beamforming Conference, BeBec-2018-D22, 2018.

[22] MA Wei, LIU Xun. DAMAS with compression computational grid for acoustic source mapping [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 410: 473-484.

[23] MA Wei, LIU Xun. Improving the efficiency of DAMAS for sound source localization via wavelet compression computational grid [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 395: 341-353.

[24] MA Wei, LIU Xun. Compression computational grid based on functional beamforming for acoustic source localization [J]. Applied Acoustics, 2018, 134: 75-87.

[25] PETER W. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967, 15(2): 70-73.

[26] CHI Yuejie, SCHARF L L, PEZESHKI A, et al. Sensitivity to basis mismatch in compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(5): 2182-2195.

[27] 鲍欢, 杨明绥, 马威. 麦克风阵列安装偏差引起的旋转声源定位误差 [J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1708-1716.
BAO Huan, YANG Mingsui, MA wei. Error in rotating sound source localization caused by installation deviation of microphone array [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8): 1708-1716. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)