

基于函数波束形成的传声器阵列声成像性能分析

刘姿琪¹ 李吉祥¹ 李 伟¹ 赵 慎¹

LIU Ziqi LI Jixiang LI Wei ZHAO Shen

摘要

在传声器阵列声成像系统中, 常规波束形成算法 (CBF) 的主瓣宽度和旁瓣级性能受限, 成像效果不能满足高精度声源定位需要, 为此研究函数波束形成算法 (FB)。首先对阵列接收信号的互功率谱矩阵进行特征值分解, 并计算对特征值对角矩阵的 v^{-1} 次幂, 以此替换 CBF 中的互谱矩阵, 进一步对波束输出进行 v 次幂运算, 由此得到 FB 输出。然后, 通过增加互谱矩阵的幂次运算, FB 能够有效克服 CBF 的主瓣宽、旁瓣高等缺陷。最后, 仿真对比了不同声源频率时 CBF 和 FB 的性能, 分析不同指数 v 对 FB 性能的影响。结果表明, 与 CBF 相比, FB 具有更高的分辨率性能, 且随着指数 v 的增大, FB 旁瓣减小, 动态范围增加。为满足工程中声成像动态性要求, 建议指数 v 一般选取 16。

关键词

传声器阵列; 常规波束形成算法; 函数波束形成算法; 互谱矩阵; 特征值分解; 声源定位成像

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.029

0 引言

近年来, 随着数字信号处理技术和阵列信号处理技术的迅速发展, 基于传声器阵列的声成像系统在航空航天、电力设备维护、气体泄漏等领域得到了广泛的研究与应用, 特别是在噪声控制方面^[1-2]。

典型的传统声源定位方法有分别运行法、近场测量法^[3]、声强测量法^[4]等。近几年发展较快的声源定位方法有相干函数法、近场声全息^[5]、波束形成^[6]等。因为波束形成稳健性且可以同时估计噪声源位置和辐射强度, 本文着重研究波束形成。延时求和、互谱成像函数等常规波束形成算法 (conventional beamforming, CBF) 虽然计算速度快、稳健性好, 但其主瓣宽度大、旁瓣高且多造成空间定位精度低, 从而限制了其进一步的应用, 因此催生了许多波束形成声源识别结果清晰化方法。

目前已有的波束形成声源识别结果清晰化方法主要可分为反卷积方法^[7-8]及谱分解重构法两大类。反卷积方法本质上是通过在波束形成的输出结果中消除点扩散函数对传统波束形成的结果进行主瓣宽度缩减和旁瓣衰减, 提高波束形成器性能。典型的反卷积方法有 DAMAS 算法、CLEAN 算法和 CLEAN-SC 算法^[8-9]。其中 DAMAS 算法是利用传统波束形成算法的输出结果与声源模型之间建立线性方程组, 通过迭代求解方程组, 提取声源信息。CLEAN 算法是由荷兰

格罗宁根大学 Schwarz^[10] 在 1978 年引入, 通过传统波束形成结果中反复迭代移除点扩散函数来消除最强噪声源的旁瓣, 清晰化声源识别结果^[10-11]。CLEAN-SC 是在 CLEAN 算法的基础上提出了解决空间中声源相关的问题, 基于同一声源产生的主瓣与旁瓣完全相干的原理, 通过传统波束形成结果中反复移除与主瓣峰值相干的旁瓣成分来清晰化声源识别结果^[12]。

谱分解重构法主要包括正交波束形成 (orthogonal beamforming, OB)^[13] 和函数波束形成 (functional beamforming, FB)^[14] 两种。正交波束形成是基于互谱矩阵的特征值分解, 其思想是将互谱矩阵分离成噪声和信号子空间, 然后利用信号子空间和噪声子空间的正交性构建空间谱函数, 通过谱峰搜索进行声源强度估计及位置的确定。正交波束形成算法计算效率极高, 但是在点声源相关时会出现定位不准确等问题。而函数波束形成的思想是在对信号互谱矩阵进行特征值分解的基础上, 利用声源的非相关性和矩阵函数来抑制旁瓣干扰和提升空间分辨率。

本文将在已有的多臂螺旋传声器阵列的基础上, 对不同频率下、不同指数 v 的函数波束形成算法实现声源定位的仿真结果进行研究分析, 给出确保成像综合性能极优的指数取值, 为该技术应用提供指导。因此本文对基于传声器阵列的声源定位、跟踪和识别有重要的研究价值和工程应用前景。

1 阵列模型和信号模型

根据声源信号位置与传声器阵列之间距离的远近, 将信号模型分为两种: 近场球面波模型和远场平面波模型^[15]。近

1. 湖南工商大学智能工程与智能制造学院 湖南长沙 410205
[基金项目] 国家级大学生创新创业训练项目“基于 MEMS 麦克风阵列声成像系统设计” (202210554013)

场球面波模型中,声源与阵列之间的距离较近,可以认为声波为球面波,近场球面波模型不仅需要考虑各个传声器接收信号的相位差异,还要考虑信号传播过程中的幅度衰减。远场平面波模型中,声源与阵列之间的距离较远,可以认为声波为平面波,远场平面波模型只需要考虑各个传声器接收信号的相位差异^[16]。

设阵列中两个相距最远的传声器之间的距离为 D ,声源与阵列平面之间的距离为 d 。若满足经验公式 $d > \pi D^2 / \lambda$,则认为信号模型为远场平面波模型,其中 λ 为声源的波长。

建立声源远场模型和阵列模型如图1所示。

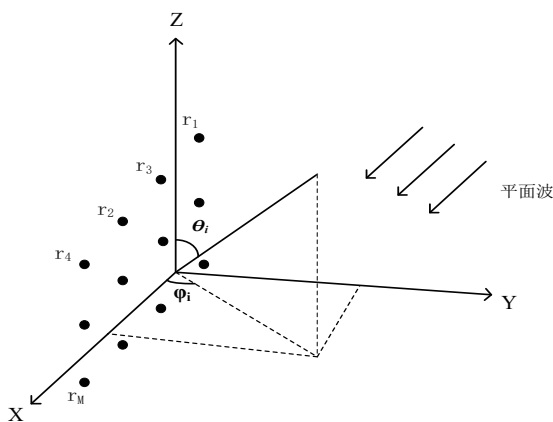


图1 平面波声源和平面阵列模型图

设传声器阵列的阵元总数为 M 。第 m 个阵元位置坐标为 $r_m = [x_m, y_m, z_m]$ 。平面阵中 $y_m = 0$;线阵中 $y_m = 0, z_m = 0$ 。

假定空间内有 L 个声源,声源信号分别表示为 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_L(t)$,且信号模型为远场平面波模型。由于本文是对平面多臂螺旋阵列进行讨论,设定所有阵元都位于 xoz 平面内,则传声器阵列的各个阵元坐标用矩阵形式表示为:

$$r = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & z_1 \\ x_2 & 0 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & 0 & z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

设 k_i 为第 i 个信号传播方向的单位向量,即:

$$k_i = - \begin{bmatrix} \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: θ_i 为第 i 个信号传播方向的水平方位角, φ_i 为第 i 个信号传播方向的俯仰角。

参考点设定为坐标原点,第 m 个阵元接收到的第 i 个声源信号可以表示为:

$$s_i(r_m, t) = s_i(t - \tau_m) \quad (3)$$

式中: $m=1, 2, \dots, M, i=1, 2, \dots, L, \tau_m$ 是信号到达第 m 个阵

元相对于参考点的时间延迟,表达式为:

$$\tau_m = r_m \cdot k_i / c \quad (4)$$

式中: c 为声速。

设定声源为窄带信号,中心角频率为 ω_i ,则阵元接收到的信号以相移形式表示为:

$$s_i(r_m, t) = s_i(t) \exp(-j\omega_i \tau_m) \quad (5)$$

式中: $\exp(\cdot)$ 表示底数为 e 的指数函数。

第 m 个阵元接收信号能够表示为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^L s_i(t) \exp(-j\omega_i \tau_m) \quad (6)$$

不考虑幅度衰减和噪声影响,用矩阵表示所有传声器阵列接收的信号为:

$$x(t) = A(\Theta) \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_L(t) \end{bmatrix} = A(\Theta) s(t) \quad (7)$$

式中: $s(t)$ 的系数矩阵为:

$$A(\Theta) = [a(k_1), a(k_2), \dots, a(k_L)] \\ = \begin{bmatrix} \exp(-j\omega_1 r_1 \cdot k_1 / c) & \exp(-j\omega_2 r_1 \cdot k_2 / c) & \dots & \exp(-j\omega_L r_1 \cdot k_L / c) \\ \exp(-j\omega_1 r_2 \cdot k_1 / c) & \exp(-j\omega_2 r_2 \cdot k_2 / c) & \dots & \exp(-j\omega_L r_2 \cdot k_L / c) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(-j\omega_1 r_M \cdot k_1 / c) & \exp(-j\omega_2 r_M \cdot k_2 / c) & \dots & \exp(-j\omega_L r_M \cdot k_L / c) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $A(\Theta)$ 为阵列流形矩阵。 Θ 表示所有可能的信号到达方位集合。在平面阵中 $\Theta = [-180^\circ, 180^\circ]$,在线阵中 $\Theta = [-90^\circ, 90^\circ]$,在窄带条件下,阵列流形矩阵只取决于信号的传播方向与阵列的几何结构。

$\alpha(k)$ 为传声器阵列对传播方向为 k 的声源信号的响应向量,表达式为:

$$\alpha(k) = \begin{bmatrix} \exp(-j\omega r_1 \cdot k / c) \\ \exp(-j\omega r_2 \cdot k / c) \\ \vdots \\ \exp(-j\omega r_M \cdot k / c) \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 常规波束形成算法

常规波束形成算法利用传声器位置的不同,对声源信号到达各个传声器存在的时间差进行延时补偿,使得各个传声器通道的声源信号同步,然后再加权求和输出最大值。因此常规波束形成又称为延时求和波束形成算法^[17]。

若采用图1所示的远场平面波模型和阵列信号模型,则常规波束形成输出为:

$$y(t) = w^H x(t) \quad (10)$$

式中: $x(t)$ 为阵元信号向量, w 为输出信号的加权向量,上标 H 表示矩阵的共轭转置。

当阵列信号模型为远场平面波模型时，加权向量 $\mathbf{w}$ 表示为：

$$\mathbf{w} = \mathbf{a}(\mathbf{k})/M = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \exp(-j\omega \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{k}/c) \\ \exp(-j\omega \mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{k}/c) \\ \vdots \\ \exp(-j\omega \mathbf{r}_M \cdot \mathbf{k}/c) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_M$ 为阵元的位置向量， $\mathbf{k}$ 为扫描方向的方向向量。

对传声器接收的声源信号进行时域采样，信号的一次采样即为一个快拍数据。若将每个传声器接收到的声源信号分为 P 个快拍信号，则第 m 个传声器接收信号可写成 $x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(P)$ ，因此常规波束形成的输出结果可以表示为：

$$\mathbf{y}(p) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(p) \quad (12)$$

当快拍数 $P \rightarrow \infty$ 时，输出功率为：

$$P_{CBF} = E\{\mathbf{y}(p)\mathbf{y}^H(p)\} = \mathbf{w}^H \left(\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{x}(p)\mathbf{x}^H(p) \right) \mathbf{w} \quad (13)$$

定义阵元接收信号的互功率谱矩阵为 $\mathbf{R}_{xx}$ ，表达式为：

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{x}(p)\mathbf{x}^H(p) \quad (14)$$

对于远场平面波模型，通过改变 $\mathbf{k}$ 的值，即改变扫描方向的水平方位角和俯仰角，使得波束在整个空间内进行扫描。当输出功率 P_{CBF} 达到最大值时，说明此时波束方向即为信号的传播方向，从而定位出声源的具体位置。将式 (14) 代入式 (13) 可以定义常规波束形成器表达式为：

$$P_{CBF} = \mathbf{w}^H(\mathbf{k}) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \quad (15)$$

3 函数波束形成算法

函数波束形成算法是由 Dougherty 于 2014 年首次提出的，利用矩阵函数对互谱矩阵做 ν^{-1} 次幂函数，然后对得到的波束输出结果做 ν 次幂复原声源分布^[18]。

由于信号的互谱矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 是半正定的厄米特矩阵 (Hermitian)，因此可表示为其特征值分解：

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}^H = \sum_{m=1}^M \sigma_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m^H \quad (16)$$

式中： $\mathbf{U}$ 是一个酉矩阵，列是 $\mathbf{R}_{xx}$ 的特征向量 ($\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M$)，包含声源位置的方向矢量信息； $\mathbf{\Sigma}$ 是一个对角矩阵，对角元素是 $\mathbf{R}_{xx}$ 的特征值 ($\sigma_1, \dots, \sigma_M$)，包含声源的功率信息。

将式 (16) 代入式 (13) 可得函数波束形成器，表达式为：

$$P_{FB} = \left[\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx}^{-\frac{1}{\nu}} \mathbf{w} \right]^\nu = \left[\mathbf{w}^H \mathbf{U} \mathbf{\Sigma}^{-\frac{1}{\nu}} \mathbf{U}^H \mathbf{w} \right]^\nu = \sum_{m=1}^M \sigma_m \left[\mathbf{w}^H \mathbf{u}_m \right]^{2\nu} \quad (17)$$

在无参数失配的情况下，当特征向量和加权向量相等时， $[\mathbf{w}^H \mathbf{u}_m]^2 = 1$ ，波束输出达到峰值形成主瓣；当特征向量和加权向量不相等时， $[\mathbf{w}^H \mathbf{u}_m]^2 < 1$ ，形成旁瓣干扰。

对其提高到 ν 次幂来进行旁瓣抑制。例如，若取 $\nu=10$ ，阵列的旁瓣值为 -7 dB，则用函数波束形成就能将旁瓣值降低为 -70 dB。由此，函数波束形成基本消除了旁瓣干扰，同时锐化了主瓣峰值，提高了空间分辨率。

FB 算法的计算开销与 CBF 算法基本相同，因为唯一增加的操作是基于互功率谱矩阵的特征值分解。

4 波束形成器性能仿真评估

本节基于如图 2 所示的孔径为 0.15 m 的平面多臂螺旋传声器阵列模型，对不同频率及不同指数 ν 情况下的函数波束形成器分别进行了 MATLAB 仿真，通过仿真得到方位谱图以及声成像图，进一步对波束形成器的性能进行分析。

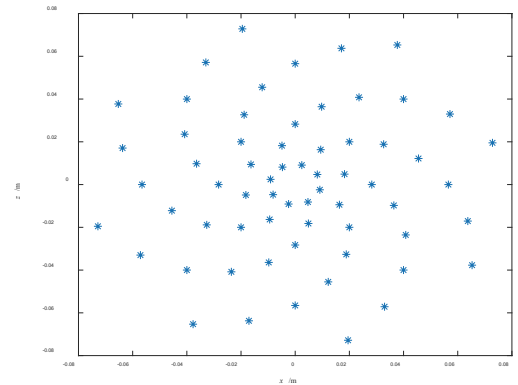


图 2 平面多臂螺旋阵列模型

为了对比不同频率及不同指数 ν 的波束形成算法的定位性能，设定模拟声源位置坐标为 $(x, y, z) = (-6, 12, 0)$ m，根据经验公式可以判断出此时处于远场模型。其方位角度数约为 -26.5°，俯仰角度数为 0°，设定采样频率为 192 kHz，快拍次数为 20 480，声速 $c=340$ m/s。为了对比两种算法的成像效果，对声源频率分别为 4 kHz、8 kHz、16 kHz 下不同指数 ν 的 FB 进行仿真，将仿真得到的波束输出结果利用指数函数进行归一为 0 dB，动态显示范围为 (-100, 0) dB，仿真所得的方位谱图与声成像图分别如表 1 和表 2 所示。当 $\nu=1$ 时，对应常规波束形成器，从成像图中可以看出在设定点声源位置出现 0 dB 左右的声学中心能被定位，但是声学成像图主瓣宽、旁瓣高且多、定位精度较低，随着声源频率的增加，主瓣变窄，提高了分辨率，符合传统波束形成的固有性质。当 $\nu>1$ 时，对应函数波束形成器，从成像图中可以看出当频率一定时，随着 ν 值的增大，主瓣宽度逐渐缩减，旁瓣基本消除，相比于常规波束形成大幅度提升了动态范围和空间分辨率。理论上 ν 值越大，旁瓣越低，动态范围越高，但是在实际测量中可能由于测量误差和阵元位置误差导致波束方向与真实的信号到达方向存在失配，导致声源识别定位精度降低。

表 1 不同频率、指数 ν 的函数波束形成器方位谱图对比

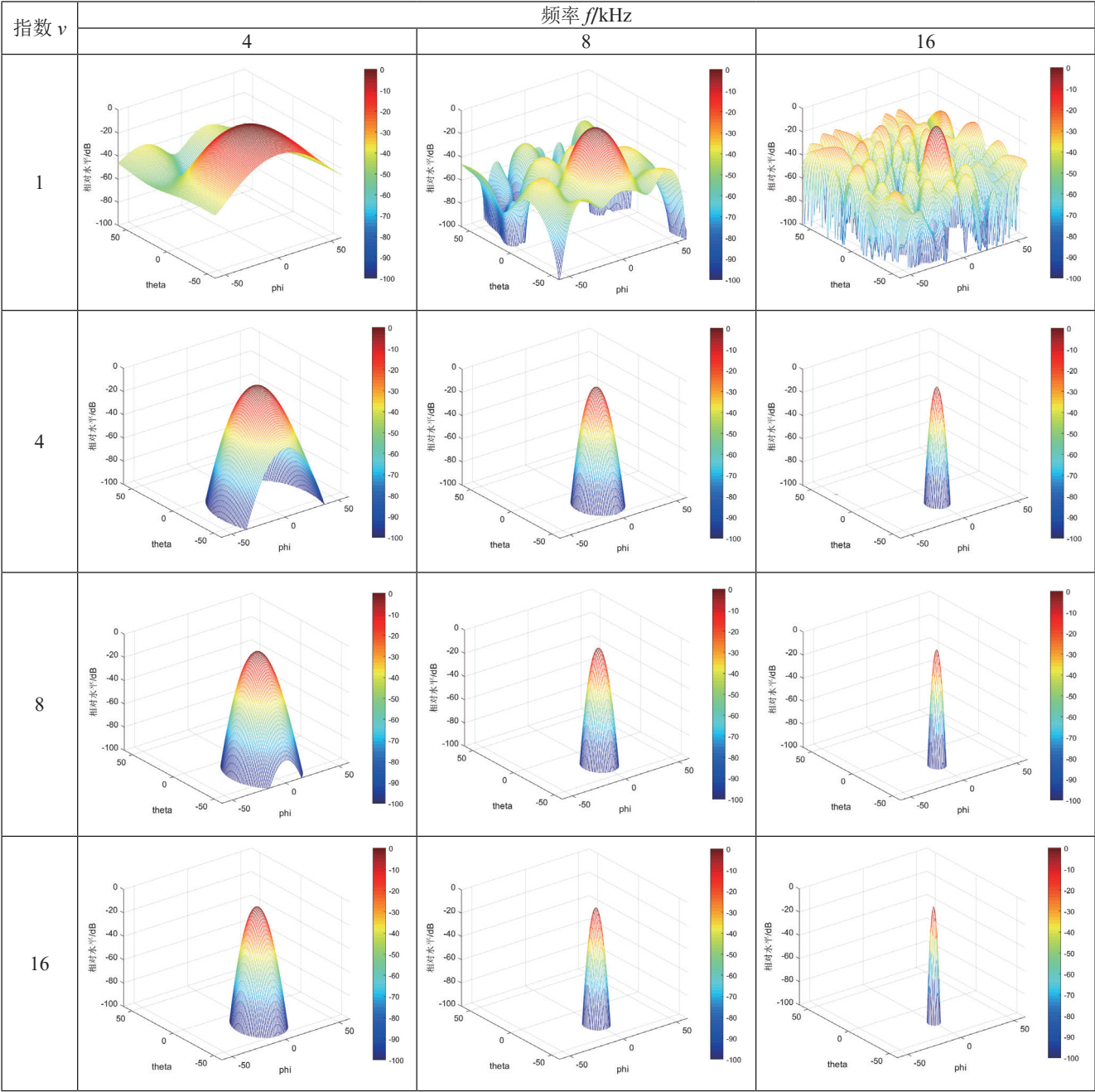


表 2 不同频率、指数 ν 的波束形成器声成像图对比

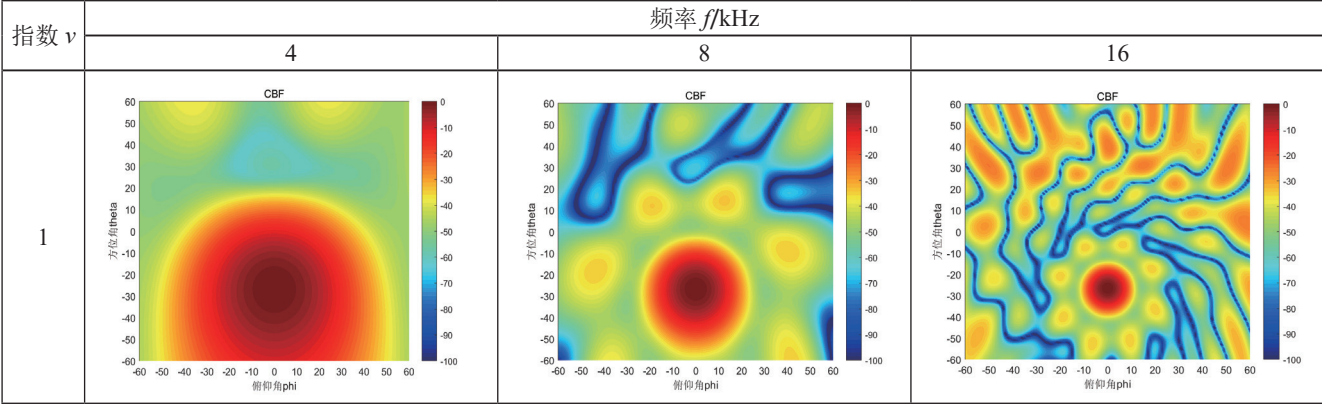
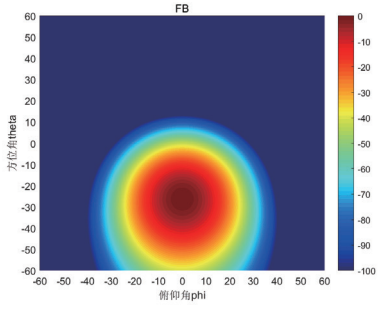
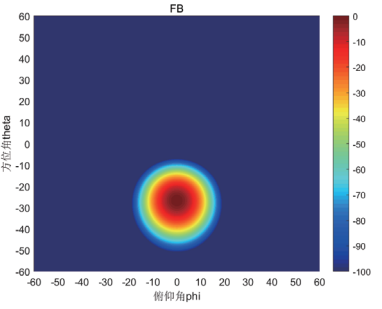
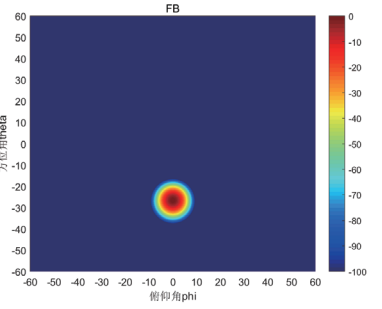
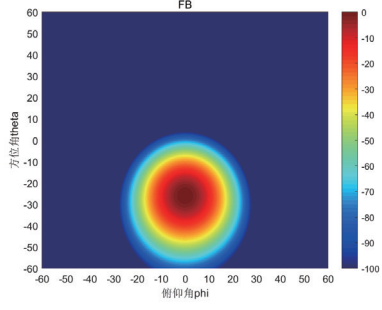
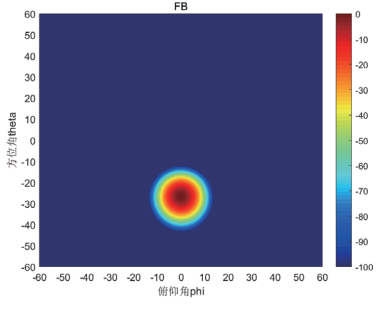
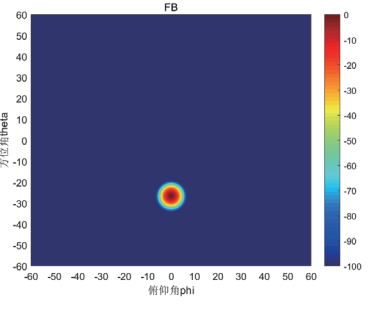
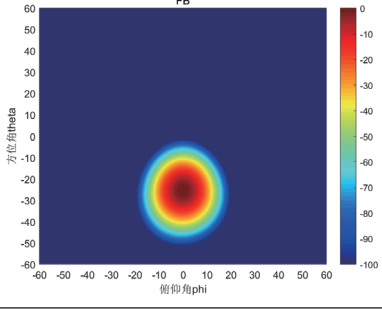
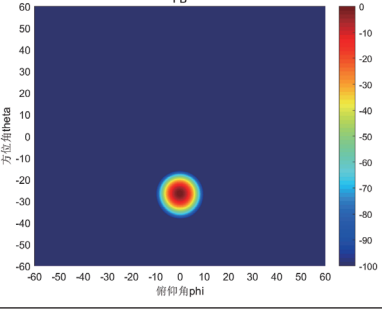
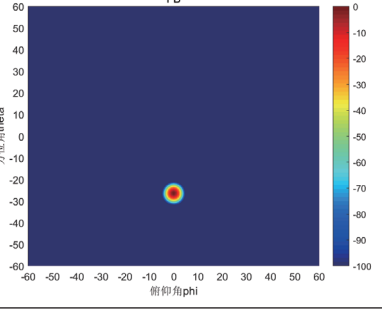


表 2(续)

指数 ν	频率 f/kHz		
	4	8	16
4			
8			
16			

为了确保获得最优函数波束形成声源识别性能，褚志刚建议指数 ν 不宜超过 16，以达到既能保证精度又能衰减旁瓣同时清晰成像的目的。

5 结语

本文对比研究了 CBF 以及 FB 的性能，基于平面多臂螺旋阵列模型，对这两种波束形成器进行仿真。结果表明，与 CBF 相比，FB 能显著缩减主瓣宽度，抑制旁瓣生成，使成像图更加清晰化、分辨率更高。且 FB 的声成像图随着指数 ν 的增大，旁瓣越低，动态范围越高，定位结果更准确。而实际测量中由于测量误差和阵元位置误差的影响，最终建议指数 ν 选取 16。

参考文献：

[1] 熊超辉,陈林松,曹跃云,等.基于声成像的气体泄漏源定位技术研究[C]//全国声学设计创新技术与文化建筑

声学工程学术会议论文集.北京:《环境工程》编辑部,2018:102-107.

[2] 张羽霓,王庆庆,唐俊,等.应用于传声器阵列定位校准的空间点声源声场拟合方法[J].声学技术,2020,39(4):445-450.

[3] 郁佳婧.平面天线近场测量系统的研究[D].南京:南京信息工程大学.2020.

[4] 鲁毅,柳小勤,伍星,等.双声源位置和强度识别的三维声强方法[J].声学学报,2020,45(3):377-384.

[5] 黄琳森,徐中明,张志飞,等.快速迭代收缩阈值声源识别算法及其改进[J].仪器仪表学报,2021,42(2):257-265.

[6] 郭云舟,贾维敏,金伟,等.基于协方差矩阵维化和导向矢量估计的鲁棒自适应波束形成算法[J].电光与控制,2020,27(10):57-61.

[7] 孙大军,马超,梅继丹,等.反卷积波束形成技术在水声阵列中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(6):860-869.

- [8] 杨洋, 褚志刚. 高性能波束形成声源识别方法研究综述 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 166-183.
- [9] 杨洋, 褚志刚. 四种典型波束形成声源识别清晰化方法 [J]. 数据采集与处理, 2014, 29(2): 316-326.
- [10] SCHWARZ U J. Mathematical-statistical description of the iterative beam removing technique (method CLEAN) [J]. Astronomy and Astrophysics, 1978, 65: 345-356.
- [11] 褚志刚, 段云场, 沈林邦, 等. 函数波束形成声源识别性能分析及应用 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 71-73.
- [12] 段云场. 基于谱矩阵分解重构的波束形成声源识别方法 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [13] SARRADJ E A. A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements [J]. Journal of sound and vibration, 2010, 329: 1553-1569.
- [14] DOUGHERTY R E. Functional beamforming [C]// 2014 5th Berlin Beamforming Conference. Berlin: Bellevue, 2014: 1-28.
- [15] 余立志. 实时阵列声成像定位技术研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [16] 周昌国. 基于传声器阵列的声源定位技术研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2012.
- [17] 崔丽娟. 输气管道泄漏监测及定位技术研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- [18] DOUGHERTY R P. Functional beamforming for aeroacoustic source distributions [C]// 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014: 2738-2755.

【作者简介】

刘姿琪 (2003—), 女, 湖南郴州人, 本科, 研究方向: 阵列信号处理。

李吉祥 (2002—), 男, 湖南涟源人, 本科, 研究方向: 阵列信号处理。

李伟 (1999—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 研究方向: 阵列信号处理。

赵慎 (1983—), 男, 河北肃宁人, 通信作者 (email: zhaoshen_nudt@163.com), 讲师, 研究方向: 阵列信号处理、卫星导航时空信息处理。

(收稿日期: 2023-06-16)

(上接第 134 页)

对于功能、性能主要是自动化测试为主, 可靠性和易用性主要是人工测试为主。

5.2 实际应用

该方案在多轮迭代开发和测试完成后, 经过充分系统评估可以商用。目前已在某运营商选取某省份局点升级试用, 该功能经受住了现网应用场景考验, 运行稳定。一线运维人员反馈该方案配置简单易操作, 能切实解决实际问题, 对该方案给予肯定和认可, 后续计划在全网范围内推广使用。

6 结语

本文立足于 5GC 规模化建设和组网演进过程中 VNFM 遇到的运维安全隐患问题, 结合某运营商 5GC 组网形态, 引入 RBAC 模型基本原理, 提出了基于 RBAC 模型的分域管理解决方案, 并对该方案进行了详细介绍、设计实现和测试验证。目前该方案已经在某运营商现网 VNFM 上得到了实际应用, 效果反馈良好。且该方案基于已有的理论模型, 设计思路清晰, 易于实现, 无特殊硬件要求, 具有一定的通用性, 可为其他类型组件的分域管理设计提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 郝慧杰, 肖建, 张粮, 等. VNF 生命周期管理系统设计与实

现 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(7): 12-16.

- [2] 金镒, 赵鹏, 王成利. NFV 网络编排器发展现状与关键技术研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2020(3): 86-91.

- [3] 阳志明, 毛斌. NFV MANO 的关键问题研究与实践 [J]. 广东通信技术, 2016(12): 21-27.

- [4] 郭冬升, 徐建良. 基于角色理论的 RBAC96 模型改进 [J]. 微型机与应用, 2016, 35(16): 9-12.

- [5] 许斌斌, 黄均才. 面向广域测量系统的 RBAC 扩展模型研究 [J]. 电工技术, 2023(9): 57-60.

- [6] 方正宁. 基于 CloudStack 的权限管理模块的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

- [7] 戴念东, 刘育文. IMS 网管分权分域功能与应用前瞻 [J]. 电信技术, 2014(1): 217-220.

- [8] 王贞凯, 叶昊灵, 戴新星, 等. 基于微服务架构的 5G 网管云化应用研究 [J]. 长江信息通信, 2023(3): 201-204.

【作者简介】

沈强 (1986—), 男, 河南信阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 航空电子设备和系统验证技术。

(收稿日期: 2023-09-20)