

引用格式: 聂磊, 贾雯, 李善强, 等. HBT 干涉声源定位技术的拓扑结构优化研究[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(5): 58-63.
[NIE L, JIA W, LI S Q, et al. Research on topology optimization of HBT interferometric sound source localization technology [J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(5): 58-63.]

HBT 干涉声源定位技术的拓扑结构优化研究

聂磊, 贾雯, 李善强, 刘梦然

(湖北工业大学 湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 本文研究了应用于声场 Hanbury Brown-Twiss(HBT)干涉空间被动定位方法中的传感器阵列拓扑结构, 优化了传感器阵列结构, 实现了对目标声源的精确定位. 基于理论和仿真, 对多种拓扑结构的阵列进行参数影响分析, 通过空气中的声源定位实验, 对所设计的拓扑结构进行验证. 结果表明, 当阵元间距在 20~100 cm 范围内, 阵间距为 7.5 m 时, 综合性能最优的拓扑结构为双五元阵. 实验结果和仿真保持一致, 实现了在阵元间距 1 m 情况下对 56.5 m 远处声源的定位, 误差为 0.3 m.

关键词: 被动定位; HBT 干涉; 拓扑结构; 双五元阵

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7180(2020)05-0058-06

Research on topology optimization of HBT interferometric sound source localization technology

NIE Lei, JIA Wen, LI Shan-qiang, LIU Meng-ran

(Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The sensor array topology applied to the Hanbury Brown-Twiss (HBT) interference space passive positioning method is studied and optimizes the sensor array structure in this paper, accurate positioning of target sound source is achieved. Based on theory and simulation, the influence of array parameters on various topological structures is analyzed, the designed topology is verified by the acoustic source location experiment in the air. The results show that when the array element spacing is in the range of 20cm~100cm and the array spacing is 7.5m, the optimal topological structure is double five-element array. The experimental results are consistent with the simulation results and indicate that the target with 56.5meters distance from sensor array (Array elements spacing of 1 meter) is accurately positioned and the error is lower than 0.3m.

Key words: passive positioning; HBT interference; topology; double five-element array

1 引言

通过声信号被动定位技术获取水下目标信息是近年来研究者关注的重点, 按照定位原理可以将传统的声源被动定位方法分为三类: 基于最大输出功率的可控波束形成法^[2-3]、基于高分辨率谱估计法^[4]

以及基于时间延迟的声源定位方法^[1,5-6].

本文提出一种基于声场 Hanbury Brown-Twiss(HBT)干涉的空间定位方法, 将光学中的 HBT 干涉理论运用到声场中, 其原理主要通过考察信号之间的相关性发现信号源, 由于声源信号具有内禀相干性, 而环境噪声没有, 因此 HBT 干涉法可

探测能量微弱,信噪比低的声源信号。

2 定位原理及算法

基于声信号和光信号都具有波动性,因此可将光学中的 HBT 干涉原理应用在声学中以实现声源的被动定位^[7-8]。光场 HBT 二阶干涉实验描述了光场强度之间的关系,当两束光波的相对时延为零时,其相干性最大,随着相对时延的增加,其相干性逐渐减小并最终趋于一个常数。本文将光学中的 HBT 干涉理论应用在声学中,当两个声传感器接收来自同一声源的信号时,信号之间存在相干性,当两束声波信号的相对时延为零时候,相干性最大,相关函数的值最大,相对时延逐渐变大时,关联函数的值逐渐下降,关联函数的值最大处就是声源的位置所在。基于此,根据光学中的二阶关联函数计算方法得到基于声场 HBT 干涉的归一化关联函数为^[9]:

$$M(\Delta T) = \frac{\langle D_1(t) \cdot D_2(t + \Delta T) \rangle}{\langle D_1(t) \cdot D_2(t) \rangle} \quad (1)$$

式中, D_1 和 D_2 表示两个声传感器分别接收到的声信号,“ $\langle \bullet \rangle$ ”表示统计平均值。两个传感器的相对位置由 $\Delta r = r_i - r_j$ 所得,其相对时间延迟为 $\Delta T = \Delta r/v$, r_i 由公式(2) 计算所得。

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2)$$

声传感器接收到的声信号由目标声源和环境噪声组成^[10],由公式(3) 所示。

$$P_j = N_j + \frac{A}{r_j} \cos \left[\omega_m \left(t - \frac{r_j}{v} \right) + \varphi_j (j = 1, 2, 3 \cdots n) \right] \quad (3)$$

式中, N_j 为环境噪声, A 为声信号的振幅大小, r_j 为声源 S 到每一个声传感器 A_i 的直线距离, v 表示声速。与光场中相同,二阶关联函数(即 HBT 关联值)会随着相对时延的变化而变化,当时间延迟 ΔT 为零时,关联函数为最大值,时延变大时,关联函数逐渐下降。所以当时延为零,关联函数最大处就是声源的位置所在。

以三角阵为例进行定位算法说明。声传感器阵列由 A_1 、 A_2 、 A_3 组成,以 A_2 为原点建立笛卡尔坐标系,其它声传感器的坐标为 $A_i(X_i, Y_i)$,设声源 S 的坐标为 (X, Y) ,其持续发射声信号,声传感器所接收到的声信号为 P_j ,图 1 中网格方块为声源可能出现的区域,以间隔 L 依次对可能区域中的点进行扫描,计算任意两个声传感器之间的时延,根据时延计算任意两个声传感器之间的归一化关联函数,最后将所有的关联函数相乘,相关系数最大点即为声源所在点。通过公式(4) 计算归一化关联函数。

$$\begin{cases} M(\Delta T) = \frac{\langle D_1(t) \cdot D_2(t + \Delta T) \rangle}{\langle D_1(t) \cdot D_2(t) \rangle} \\ M(\Delta T) = \frac{\langle D_1(t) \cdot D_3(t + \Delta T) \rangle}{\langle D_1(t) \cdot D_3(t) \rangle} \\ M(\Delta T) = \frac{\langle D_2(t) \cdot D_3(t + \Delta T) \rangle}{\langle D_2(t) \cdot D_3(t) \rangle} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ΔT_{ij} 表示声波到达不同传感器之间的时间延迟,最终求得的归一化关联函数为:

$$M = M(\Delta T_{12}) \times M(\Delta T_{13}) \times M(\Delta T_{23}) \quad (5)$$

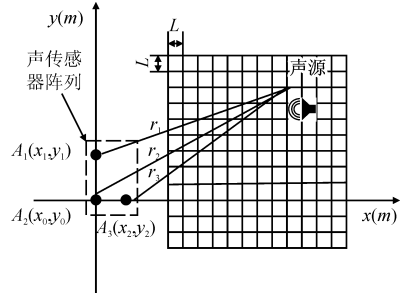


图 1 HBT 干涉定位原理示意图

3 阵列拓扑结构与优化

阵元间距、阵元的空间分布形式、阵间距是声传感器阵列拓扑结构的重要参数,通过仿真与实验对声传感器阵列的参数进行分析,优化拓扑结构参数,实现对远距离声源的精确定位。

3.1 阵元间距

阵元间距的设计既要满足对远距离声源定位的精度又要避免阵列结构过大。若阵元间距过小,影响时延的可分辨率以及时延估计的精度,但是若阵列结构过大,对系统的便捷性和可实现性产生一定的影响,同时要避免计算关联函数相关性时产生假性相关,因此在 20~100 cm 范围内选择不均等的阵元间距。

3.2 阵元的空间分布形式

一维线型阵列由 2~10 个声传感器按照线型成直线排列,二维平面阵列在应用中常见的拓扑结构有三角形,四边形,五元十字型等^[11]。当定位远距离声源时,若阵元间距较小,使得声源与声传感器之间的交汇角很小,定位分辨率降低,仅能确定声源的方向,而无法确定声源的具体位置。因此要确定一个声源的位置,必须有两个以上的基阵,从而形成多条相交的直线,交点即为声源位置所在。为了选择最合适的拓扑结构,对直线阵,双三角阵,双四元阵,双五元阵以及双 N 元阵的拓扑结构进行参数设计。

3.2.1 一维直线阵

为了避免假性相关,将 i 个声传感器不均匀成

一字型排列,阵元间距在 20~100 cm 进行选择. 传感器过少对捕捉声信号有一定的影响,过多的传感器又会造成资源浪费,因此将 i 定为 6. 声传感器的摆放结构如图 2 所示. 将六个传感器 $A_1 \cdots A_6$ 成直线进行排列,初始阵间距设为 5 m,坐标点依次为 $(0, 0), (0, 0.7), (1, 0), (4.5, 0), (5.4, 0), (6, 0)$, 在此结构基础上,对其进行仿真验证.

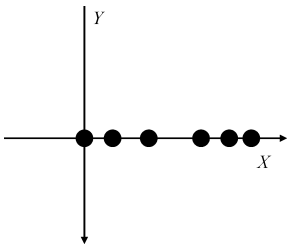


图 2 直线型拓扑结构

3.2.2 二维平面阵列

通过双三角阵,双四元阵,双五元阵以及双六元阵的仿真与理论分析,找出最合适的声传感器拓扑结构. 各阵列的拓扑结构示意图如图 3 所示.

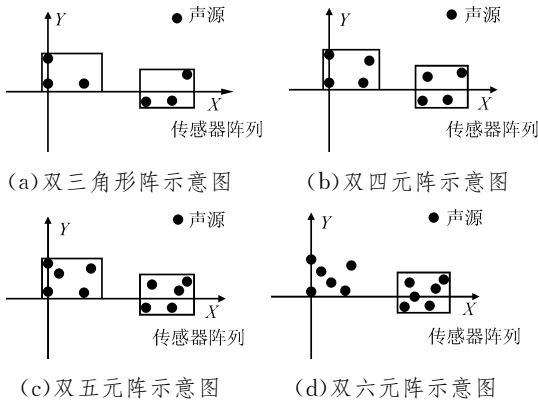


图 3 各阵列的拓扑结构示意图

为了保证阵元结构这一单一因素对声源定位结果产生的影响并将其量化,在确保阵间距(初始阵间距:5m)以及阵元间距一致的情况下,以不规则双三角形(避免因对称性产生假性相关)为基础阵列结构,逐渐增加阵元,改变拓扑结构,对同一声源点进行定位,观察不同拓扑结构对定位结果的影响. 各阵列的阵元的坐标表如表 1 所示.

3.3 阵间距的设计

为了确认阵间距不同对定位结果的影响,在阵元的空间分布形式的设计的基础上,不改变阵元间距和阵列的拓扑结构,分别将阵间距变为 7.5 m, 10 m(避免阵列结构过大,在 10 m 范围内选择)对多个声源点进行仿真. 根据仿真数据绘图并拟合各阵列拓扑结构与可位最远距离的关系,找出它们之间的关系.

表 1 各阵列阵元的坐标

结构	阵元坐标	
	阵列 1	阵列 2
双三元阵	(0.0,0.1) (0.0,1.2) (0.9,0.1)	(4.5,-0.4) (5.8,0.7) (5.0,-0.4)
双四元阵	(0.0,0.1) (0.9,0.1) (0.0,1.2) (1.3,1.0)	(4.5,-0.4) (5.8,0.7) (5.0,-0.4) (4.7,0.5)
双五元阵	(0.0,0.1) (0.9,0.1) (0.2,0.8) (0.0,1.2) (1.3,1.0)	(4.5,-0.4) (5.8,0.7) (5.6,0.3) (5.0,-0.4) (4.7,0.5)
双六元阵	(0.0,0.1) (0.9,0.1) (0.2,0.8) (0.0,1.2) (1.3,1.0) (0.5,0.5)	(4.5,-0.4) (5.8,0.7) (5.6,0.3) (5.0,-0.4) (4.7,0.5) (5.0,0.0)

4 仿真结果

根据上文对阵元间距,阵元的空间分布形式以及阵间距的设计,进行仿真并分析,找出综合性能最优的阵列拓扑结构.

4.1 一维直线阵仿真

当阵元间距在 20~100cm 范围内选择,阵间距为 5 m 时,对坐标为 $(3, 30)$ 的声源点定位仿真,结果如图 4 所示,从图中可以看到,直线阵虽然可以准确的找到声源点,但是在 Y 轴对称方向出现一个伪声源点,造成错误定位. 因此直线阵只可在 $[0, 180^\circ]$ 范围内定位.

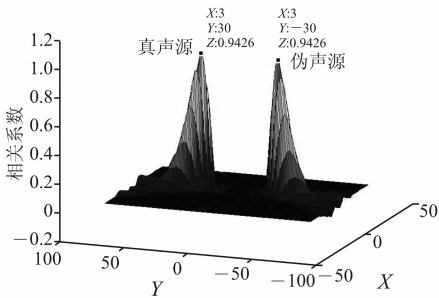


图 4 直线阵仿真结果

4.2 二维平面阵仿真

根据 2.2 节对四种二维平面阵列参数的设计进行声源定位仿真,观察拓扑结构对定位结果的影响,仿真结果如图 5 所示. 不同阵列的拓扑结构对同一声源点 $(3, 30)$ 进行定位仿真,四种阵列的拓扑结构均有明显的峰值,可确认声源所在位置,可见二维平面阵列弥补了一维线性阵列在定位区域上的不足,实现了 $[0, 360^\circ]$ 的全面定位,但是在峰值下方出现一个横脊(声源较远时,其与阵元的交汇角较小,定位分辨率降低,出现横脊).

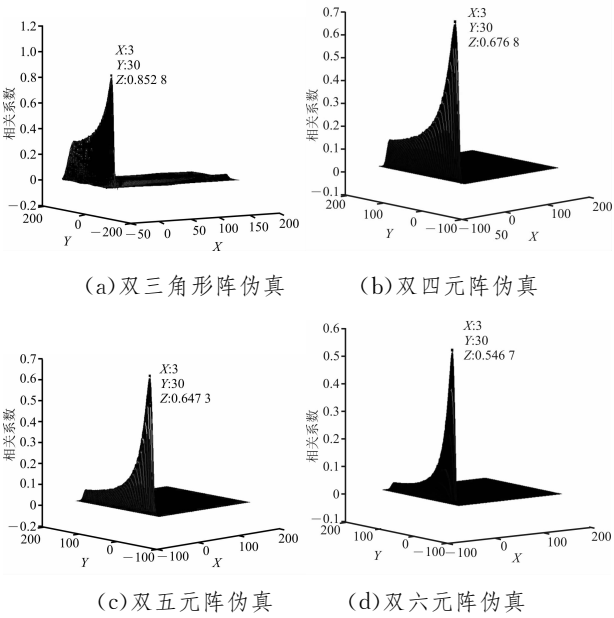


图 5 各阵列对同一声源仿真结果

当横脊很大时,较难确定峰值(声源)所在点,因此,以 50%峰值瓣宽为评价标准,如图 6 所示,在相同的扫描范围内,瓣宽 D_y 值越窄峰值越容易分辨,定位效果越好,若 50%处瓣宽为 ∞ ,则认为不能确定声源所在位置. 四种阵列结构情况下瓣宽值如表 2 所示.

$$D_y = Y_1 - Y_2 \tag{6}$$

式中, Y_i 代表 50% 处 Y 轴坐标值.

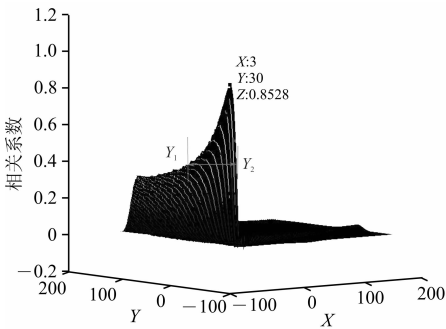


图 6 瓣宽计算示意图

表 2 各阵列结构下瓣宽值

阵列结构	双三角阵	双四元阵	双五元阵	双六元阵
瓣宽值	73	42	32	25

由表 2 所知,随着阵元个数的增多,瓣宽值变小增强了定位的分辨率. 双六元阵相较于双五元阵瓣宽值有一定的改善,但效果甚微. 通过多组仿真对比发现:在阵元间距以及阵间距一样的情况下,不同的拓扑结构可分辨的最远声源点不同,阵元个数越多,可定位距离越远,但是有一个极限,从定位性能和节省资源两方面综合考虑,双五元阵为最合适的拓扑结构.

4.3 不同阵间距下的仿真结果

在阵元间距以及拓扑结构一致的情况下将阵间距变为 7.5 m 以及 10 m 进行仿真,同样以瓣宽值为参考依据,观察阵间距对可定位最远距离的影响. 通过对多组仿真结果进行分析,在阵元间距以及拓扑结构一样的情况下,随着阵间距的变大,可定位最远距离逐渐增大,具体值如表 3 所示.

表 3 不同阵间距时各阵列定位最远距离/m

阵列结构	阵间距 5m	阵间距 7.5m	阵间距 10m
直线阵	20	38	45
双三角形阵	25	45	56
双四元阵	38	60	75
双五元阵	48	70	90
双六元阵	52	76	95

由表 3 可知,同一种阵列结构在只改变阵间距时,随着阵间距的增大,可定位最远距离变大. 双 6 元阵在阵间距分别为 5 m,7.5 m,10 m 时,可定位最远距离分别为 52 m,76 m,95 m,阵间距依次增长 2.5 m 的情况下,阵间距为 7.5 m 时,可定位最远距离增长幅值最大. 不同阵间距时各阵列结构与可定位最远距离的关系趋势大致一样,对其分别进行拟合.

阵间距为 5 m 的关系表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 54.17\sin(0.205\ 1x - 0.037) + 3.083\sin(1.321x + 0.679), & 0 \leq x \leq 10 \\ 52, & 10 < x \end{cases} \tag{7}$$

阵间距为 7.5m 的关系表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 585.4\sin(0.015x + 0.012) + 25.64\sin(0.363\ 2x - 0.015\ 6), & 0 \leq x \leq 10 \\ 76, & 10 < x \end{cases} \tag{8}$$

阵间距为 10m 的关系表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 626.7\sin(0.156\ 9x + 0.020\ 3) + 25.19\sin(0.432\ 9x - 0.513\ 9), & 0 < x \leq 10 \\ 95, & 10 < x \end{cases} \tag{9}$$

式中, x 代表阵列不同的拓扑结构, $f(x)$ 表示可定位距离, 拟合曲线见图 7. 当 x 在 $0 < x \leq 10$ 范围内, 三条曲线均符合公式(10) 的模型.

$$f(x) = a_1 \sin(b_1 \times x + c_1) + a_2 \sin(b_2 \times x + c_2)$$

(10)

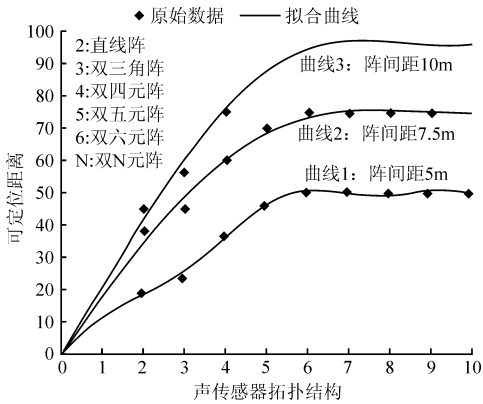


图 7 各阵间距时拓扑结构与定位距离拟合图

综上所述, 根据理论分析与仿真验证, 综合性能最优的阵列的拓扑结构参数如下:

- (1) 阵元间距在 20~100 cm 范围内进行选择.
- (2) 阵元空间分布形式为不规则双五元阵.
- (3) 阵间距为 7.5 m 时既可以避免阵列结构过大, 又可以实现对较远距离声源的定位.

5 实验验证

以 HBT 干涉定位原理和仿真为基础, 建立声场二阶干涉的被动定位系统, 对其进行试验验证. 整个被动定位系统主要由信号发生模块、数据采集模块和数据存储分析模块 3 部分组成. 系统结构图如图 8 所示. 信号发生模块产生一个连续不断的声信号; 数据采集模块由声传感器阵列与数据采集卡组成, 据上文分析将声传感器摆放成双五元阵, 阵元间距在 20~100 cm 范围内且阵间距为 7.5 m 的情况下拾取目标声源信号, 通过数据采集卡对 10 路信号同时采集并传输到控制系统中, 采集卡采样率设置为 2.5 MHz; 数据存储与分析模块对采集到的声信号处理进而确定被监测声源相对于已知位置的角度和距离(坐标). 结构流程如图 9 所示.

声源被动定位实验实物图如图 10 所示, 声源 S 产生持续不断的信号, 声传感器阵列及时接收其信号, 根据上文分析确定阵列结构为双五元阵, 通过数据采集卡对声传感器阵列接收到的信号进行采集, 每组采集 2 500 个点.

由于真实环境中声信号多为混合频率信号, 故

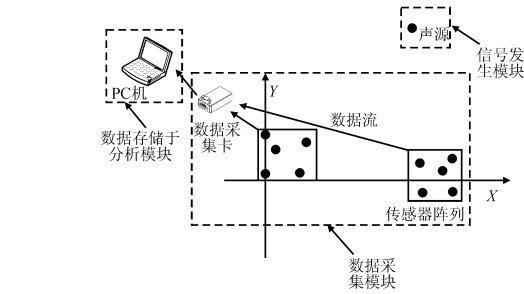


图 8 系统结构图

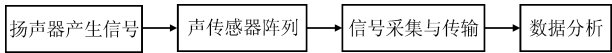


图 9 结构流程图

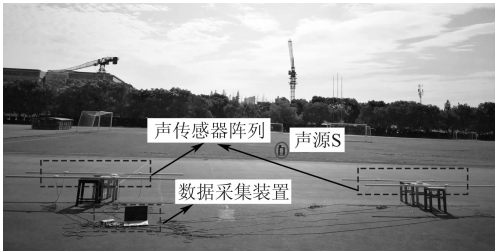


图 10 系统结构图与实验实物图

在此声源 S 选择播放多频的音乐片段, 分别对坐标为(5.5, 24), (5, 35.5), (4, 41), (8, 56.5)处声源进行声源定位测试, 实验结果如图 11 所示, 均可以较精确的找到声源所在位置.

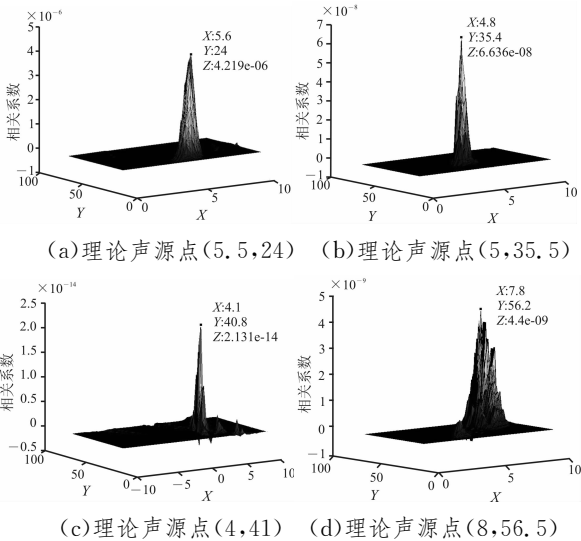


图 11 双五元阵不同声源点定位测试结果

实验结果及误差分析如表 4 所示. 测得的误差均小于 1%. 在 56.5 米处定位误差为 0.3 米, 考虑到声传感器安装精度、周围环境噪声、声音在空气中的快速衰减等影响, 可视为实现精确定位.

表 4 实验结果及误差分析

序号	理论值/m	测量值/m	误差/m	相对误差/%
1	(5.5,24)	(5.6,24)	0.1	0.42
2	(5.35,5)	(4.8,35.4)	0.2	0.56
3	(4,41)	(4.1,40.8)	0.2	0.49
4	(8.56,5)	(7.8,56.2)	0.3	0.53

6 结束语

基于声信号与光信号均具有波动性, 本文将已经充分在光学理论中验证了的 HBT 二阶干涉理论应用于声场中, 为声源被动定位方法的研究提供了一个新视角. 根据采样定律确定了阵元间距, 通过对不同拓扑结构的阵列进行多组仿真, 确定阵元的空间分布形式为双五元阵, 在不同阵间距情况下对阵列拓扑结构与可定位距离的关系进行拟合并给出关系式, 确定阵间距为 7.5 m. 根据对阵列拓扑结构参数的设计与仿真, 确定阵列拓扑结构为双五元阵. 对双五元阵定位效果进行实验验证, 结果表明, 双五元阵对多个声源点均可较准确定位到其所在位置, 定位相对误差都在 1% 以内, 56.5 米处远的声源定位误差为 0.3 m. 考虑到环境噪声, 声信号衰减等因素影响, 可视为实现了精确定位. 本文的研究内容为 HBT 被动定位法的进一步开展奠定了基础.

参考文献:

[1] 刘云飞. 基于麦克风阵列的声源定位方法的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.

[2] DAE-HOON SEO, JUNG-WOO CHOI, YANG-HANN KIM. Impulsive Sound Source localization using Sing peak and Rms Estimation of the time-domain beamformer output[J]. mechanical Systems and Signal

Processing, 2014(49):1-2.

[3] 杨雪. 数字阵最优稳健波束形成算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[4] 薛彦杰. 基于麦克风阵列的声源被动定位技术研究[D]. 山西: 中北大学, 2017.

[5] 景源, 姜雪莹. 广义二次相关时延估计算法改进[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 97-103.

[6] 孙放, 李四超, 来金梅. 迭代优化算法的自校准麦克风阵列声源定位系统[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(1): 6-9.

[7] 刁文婷, 何军, 刘贝, 等. 不同光场二阶相干度的实验研究[J]. 量子光学学报, 2014, 20(1): 1-7.

[8] TANG Z, BAI B, ZHOU Y, et al. Measuring Hanbury Brown and twiss Effect of multi-Spatial-mode Thermal Light at Ultra Short Time Scale by Two-Photon absorption[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-16.

[9] 彭春生. 混沌光场的二阶相干度分析与测量及相空间重构[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.

[10] 韩强. 水下运动目标被动声纳信号建模研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.

[11] 刘璐. 基于麦克风阵列的机器人声源定位系统研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.

作者简介:

聂磊 男, (1978-), 博士, 教授. 研究方向为微纳加工工艺、电子封装及其可靠性. E-mail: leinie@hbut.edu.cn.

贾雯 女, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为声源被动定位技术.

李善强 男, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为声源被动定位技术.

刘梦然 女, (1991-), 博士, 副教授. 研究方向为声源被动定位技术及 MEMS 传感器.

(上接第 57 页)

[10] RICHARD O, SILIGARIS A, BADETS F, et al. A 17.5 to 20.94 GHz and 35 to 41.88 GHz PLL in 65nm CMOS for wireless HD applications[C]// Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2010 IEEE International. San Francisco, California, USA, IEEE, 2010.

作者简介:

李聪 男, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为模拟与射频集成电路设计.

刘自成(通讯作者) 男, (1987-), 博士, 工程师. 研究方向为模拟与射频集成电路设计. E-mail: minezicheng@163.com.

安建 男, (1980-), 博士. 研究方向为电磁场与微波技术.