

一种分布式麦克风阵列定位算法及性能分析

张竹,陈建峰,程萍

(西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

摘要: 研究了一种基于该方法的分布式麦克风阵列,详细分析了节点测向离散误差产生的原因,仿真分析了该误差对最终定位结果的影响,并提出一种节点优选的建议。仿真结果表明,所述措施能够有效消减定位误差。

关键词: 分布式;测向交叉定位;声源;定位误差

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)11-0075-03

A localization algorithm and its performance analysis for distributed microphone array

Zhang Zhu, Chen Jianfeng, Cheng Ping

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper studies a distributed microphone array which based on the bearing-crossing locating method. Firstly, it analyses the cause of the discrete bearing measurement errors in detail, and the influence on the final result of localization. Then, it gives advice on an optimal nodes selection. The simulation shows that these measures can reduce the error effectively.

Key words: distributed; bearing-crossing locating; sound source; localization error

分布式声源定位系统已有许多应用,如空中被动声定位^[1]、智能雷场^[2]、水下监控^[3]等。而作为应用极为广泛的测向交叉定位^[1-2]系统的性能与许多因素有关,如精度与实时性的平衡、抗噪声能力等。对噪声而言,可以通过诸如噪声抑制算法、滤波等措施来改善。

在实验中发现,由于该方法在利用数字处理芯片实现的过程中,多个环节采用数字化处理,各测向节点存在固有的离散定向误差,使得此方法的定位性能与节点数目及布局呈现密切的关系,并造成定位结果与真实值的偏离,称之为“系统定位误差”。由于此类误差无法避免,因此,掌握其分布特性,对阵列布局、传感器节点选取具有重要的实际意义。

以往的研究工作主要集中在对各类应用的定位算法流程及外界噪声干扰导致定位误差的研究,在具体分析导致系统定位误差产生的机理,及节点数量跟布局对其影响等方面的研究较少。鉴于此,本文以地面车辆声源定位为例,分析一种基于麦克风十字阵构建的定位系统的系统定位误差,及其分布特性,并引出节点优选的建议。

1 数学模型

假设目标声源是自远场入射的宽带平面波,传播介质均匀。单个麦克风节点模型如图1所示, O 为参考点, S 为车辆声源; α 是 OS 与 x 轴正方向的夹角,麦克风阵元 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 的坐标分别为 $(d/2, 0)$ 、 $(0, -d/2)$ 、 $(-d/2, 0)$ 和 $(0, d/2)$ 。

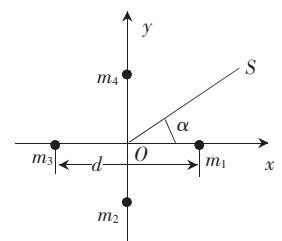


图1 麦克风十字阵模型

单个节点其探测范围有限,在有限的孔径条件下,无法获得较高精度的目标空间位置信息。通过多个节点组网,不仅可以扩大对目标的时空探测范围,而且可以融合多个节点的定向信息,获得更为准确的声源目标位置估计。

分布式阵列网络的测向交叉定位模型如图2所示。探测区域内有若干个节点 M_1, M_2, \dots, M_n 。节点 M_k (其中 $k \in [1, n]$)获得的目标方向角为 α_k ,各节点同一时刻对同一目标的估计结果连线的交点即为目标的位置。

实际应用时,由于测量误差等因素的影响,各节点

技术与方法 Technique and Method

估计出的方向角连线不会交汇于一点,而可能是一块区域,这时就需要适当的算法对车辆位置进行估计。

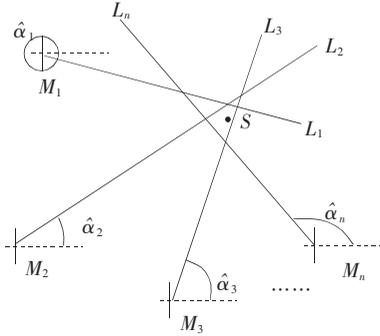


图2 测向交叉定位模型

2 定向与定位算法与分析

基于数学模型,通过两个步骤获得车辆声源的位置。第一步,利用单个麦克风十字阵列(即单个节点)对目标进行定向;第二步,把各个节点的自身位置信息和定向信息带入最小二乘估计算法计算得到车辆的二维位置估计。

2.1 单节点定向算法

在被动声源定向中,通常采用基于TDOA(Time Delay of Arrival)的估计技术,它由于较小的计算量和较高的精度而备受关注^[5]。本文选用互功率相位CSP(Crosspower-Spectrum Phase)估计算法^[6]。

在平面波传播模型中,对于麦克风对 (m_i, m_g) ,声源波达方向可以由下式获得:

$$\hat{\alpha}_{ig} = \arccos\left(\frac{c\hat{\tau}_{ig}}{d_{ig}}\right), 0 \leq \hat{\alpha}_{ig} \leq \pi \quad (1)$$

其中, d_{ig} 、 $\hat{\tau}_{ig}$ 分别表示麦克风对 (m_i, m_g) 间的距离和接收信号的相对延迟的估计值。

麦克风对间的时延可以按下面的方法估计:

$$\hat{\tau}_{ig} = \arg \max_{\tau} R_{ig}(t, \tau) \quad (2)$$

其中,

$$R_{ig}(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{ig} e^{j2\pi f \tau} df \quad (3)$$

$$\varphi_{ig} = \frac{X_i(t, f) X_g(t, f)}{\|X_i(t, f)\| \|X_g(t, f)\|} \quad (4)$$

式中 $X_i(t, f)$ 是接收信号 $x_i(t)$ 的频谱, φ_{ig} 是归一化互功率谱, $R_{ig}(t, \tau)$ 是互相关函数。

以上为一个麦克风对获得的方向估计,因此每个十字阵可以获得两个目标方向角。为了减轻运算量,可以将两者进行比较,选取其中精度较高的作为该节点最终对目标的方向估计 $\hat{\alpha}^{[7]}$ 。

实际应用中,CSP算法的数字实现导致函数 $R_{ig}(t, \tau)$ 在延迟域内只能整点采样,即 $\tau = l/F_s$, F_s 为采样频率, l 为满足公式定义域内的所有整数。这种时延估计值具有离散性,估计精度受到采样率的限制,并且当采样

频率、阵元间距一定时,计算结果精度也就确定了。

如果将实验条件代入式(2),可获得 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的全部离散角度值,并把该合集记为 Ω 。 Ω 的分布如图3所示,可知其呈现关于 45° 、 135° 、 225° 和 315° 的对称分布,且越靠近 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的离散角度分布越密。这种现象实质上是与阵列孔径的变化有关。

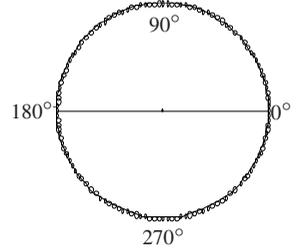


图3 离散角度合集 Ω 的分布

2.2 分布式定位方法

在获得各个节点计算得到的方向角之后,采用最小二乘算法对车辆进行定位计算。假设车辆的估计位置为 (\hat{x}, \hat{y}) ,探测区域内共有 n 个节点, d_k ($k \in [1, n]$)为车辆到节点 M_k ($k \in [1, n]$)的距离。对于任意节点 $M_k(x_k, y_k)$,可以得到以下方程:

$$\hat{x} = x_k + d_k \cos \hat{\alpha}_k \quad (5)$$

$$\hat{y} = y_k + d_k \sin \hat{\alpha}_k$$

两式分别乘以 $\sin \hat{\alpha}_k$ 和 $\cos \hat{\alpha}_k$ 相减后得:

$$\hat{x} \sin \hat{\alpha}_k - \hat{y} \cos \hat{\alpha}_k = x_k \sin \hat{\alpha}_k - y_k \cos \hat{\alpha}_k \quad (6)$$

$$\text{令:} \quad g_k = x_k \sin \hat{\alpha}_k - y_k \cos \hat{\alpha}_k \quad (7)$$

$$C = [g_1, g_2, \dots, g_n]^T \quad (8)$$

$$H = \begin{bmatrix} \sin \hat{\alpha}_1 & \sin \hat{\alpha}_2 & \dots & \sin \hat{\alpha}_n \\ -\cos \hat{\alpha}_1 & -\cos \hat{\alpha}_2 & \dots & -\cos \hat{\alpha}_n \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

其中 C 为 $n \times 1$ 的向量, H 为 $n \times 2$ 的矩阵。利用最小二乘法^[1, 4-5],可得:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T C^T \quad (10)$$

从而,得到车辆的二维位置估计值 (\hat{x}, \hat{y}) 。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

实际中,由于CSP算法不能获得任意精确的估计值,只能通过就近原则,从离散角度集合 Ω 中选取最接近的角度值作为估计结果,造成了单节点的定向离散误差。这类误差传递给下一步的最小二乘算法,将会进一步造成系统定位误差。本文重点对此类误差的特性进行仿真,对仿真条件做如下约定:

(1) 监测区域为 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 的正方形;

(2) 仅存在一个宽带声源($100 \text{ Hz} \sim 4000 \text{ Hz}$);

(3) 仿真中不考虑环境噪声对定位误差的影响,仅分析离散定向误差因素;

(4) 待测目标原则上可处于监测区域内任意位置。在仿真时,以 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的方块为间隔进行平面扫描,依次计算当目标处于各方块中心处时,整个定位系统对其

技术与方法 Technique and Method

定位的误差。

3.2 仿真结果

图 4 为将整块监测区域扫描后得到的误差等高线示意图, 等高线附近的数字表示系统定位误差的大小。节点坐标 $M_1(350\text{ m}, 100\text{ m})$ 和 $M_2(450\text{ m}, 300\text{ m})$ 。当车辆处于两节点端射方向上时, 会产生较大的误差。这是因为当目标处于 2 个节点连线上时, 2 个节点计算获得的两个方位角刚好相等或相差 180° , 理论上是无法得到目标在该线上的准确位置的。实际并非如此, 由于各节点定向离散误差的存在, 从而在式(10)求逆时造成较大病态, 导致较大的误差。

下面对 3 个节点和 4 个节点的布局进行仿真。三角形分布的 3 个节点的情况如图 5 所示, 其中节点坐标为 $M_1(350\text{ m}, 100\text{ m})$ 、 $M_2(550\text{ m}, 100\text{ m})$ 和 $M_3(450\text{ m}, 300\text{ m})$ 。4 个节点的情况如图 6 所示。其中 4 个节点的坐标分别为 $M_1(350\text{ m}, 100\text{ m})$ 、 $M_2(550\text{ m}, 100\text{ m})$ 、 $M_3(350\text{ m}, 300\text{ m})$ 和 $M_4(550\text{ m}, 300\text{ m})$ 。

由图 4、图 5、图 6 可知, 随着节点数的增加, 系统定位误差会不断减小。多节点包围的区域如 Q_1 、 Q_2 是定位性能比较理想的区域。

另外, 各节点的连线端射方向及附近区域都存在较大的估计误差, 这是系统定位误差的主要分布区域。

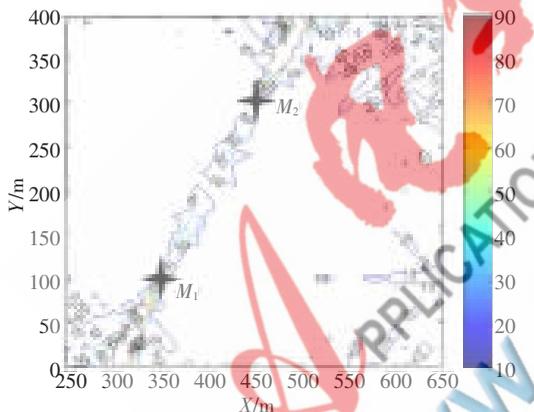


图 4 2 节点的误差分布图

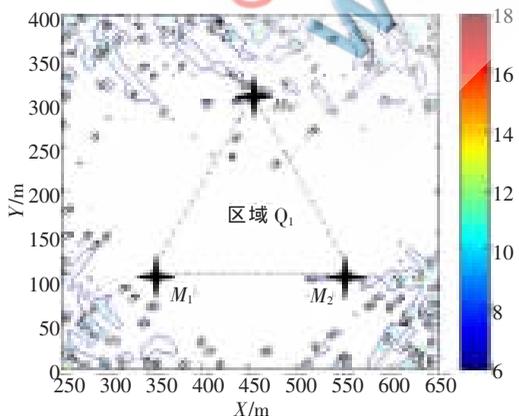


图 5 3 节点的误差分布图

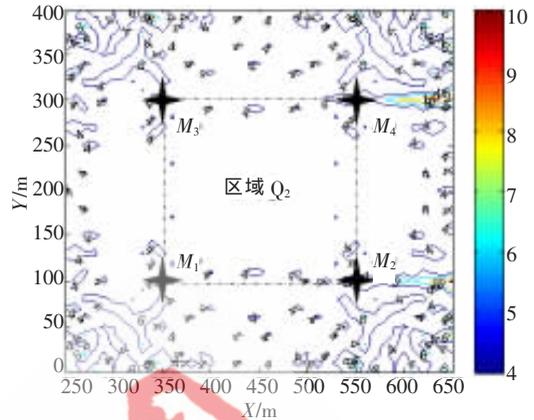


图 6 4 节点的误差分布图

3.3 节点优选

对节点数目及布局对定位误差的影响进行分析。现有 4 个节点如图 7 所示, 各节点的位置坐标分别为 $M_1(-50\text{ m}, 0\text{ m})$ 、 $M_2(0\text{ m}, -50\text{ m})$ 、 $M_3(0\text{ m}, 50\text{ m})$ 和 $M_4(50\text{ m}, 0\text{ m})$ 。 R 为 M_1 、 M_2 和 M_3 包围的一块 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的探测区域。

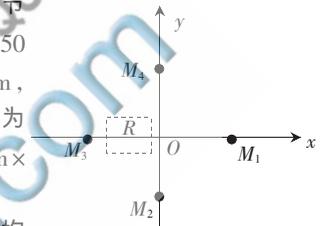


图 7 节点分布图

以该区域定位误差的平均值 $\bar{\varepsilon}$ 为标准, 比较节点数目不同对定位结果的影响, 见表 1。

表 1 节点数量和 $\bar{\varepsilon}$ 关系表

节点	M_1, M_2	M_1, M_2, M_3	M_1, M_2, M_3, M_4
$\bar{\varepsilon}/\text{m}$	1.242 6	0.884 2	0.703 2

由上表易知, 随着节点数量的增加, 区域 R 内的目标定位误差平均值降低。然而, 这种情况并不是绝对的。仍以图 7 为例, 取 4 个节点的情况。现将节点 M_4 以 200 m 为间隔向 x 轴正方向平移, R 内的定位误差平均值如表 2 所示。

表 2 节点 M_4 的位置与 $\bar{\varepsilon}$ 关系表

M_4 的 x 轴坐标	50 m	250 m	450 m	650 m
$\bar{\varepsilon}/\text{m}$	0.703 2	1.520 2	3.082 0	3.863 9

可以看出, 随着节点 M_4 的远离, $\bar{\varepsilon}$ 在不断增加, 当 x 轴坐标值超过 250 m 以后, 定位效果甚至不如 2 个或者 3 个节点的情况。

这种现象是因为最小二乘原理是令变量的估计误差平方和达到最小, 在单节点定向偏差一定的条件下, 离目标距离越远的节点对定位结果的影响反而越大。所以, 在车辆声源定位时, 优先选取离目标较近的节点信息进行运算以提高定位精度。

在实际测量中, 由于车辆位置未知, 不易确定哪些节点离目标较近。一般可通过能量检测或信噪比检测等方法来解决。

技术与方法 Technique and Method

本文研究了一种基于测向交叉定位法的分布式麦克风阵列系统定位误差特性,并得出以下结论:

(1) CSP 定向算法得到的离散角度值呈一定规律分布,对融合算法的最终定位结果造成一定的影响;

(2) 各节点的连线端射方向及附近区域都存在“模糊估计误差”,这是系统定位误差的主要分布区域。处于多节点包围的区域内误差分布较小;

(3) 节点数量和节点位置不同也会造成误差大小以及分布的差别,但并非节点越多定位误差越小,优先选取离声源目标较近的节点信息进行运算可以提高系统的定位精度。

参考文献

- [1] 杨凌云,谢小娟.基于声音能量的单目标定位[J].长春工业大学学报,2007,28(2):202-205.
- [2] 鄧熙彪,王伟策,刘强,等.声被动三基阵定位算法应用[J].解放军理工大学学报.2006,7(4):376-379.
- [3] 孙勇,赵俊渭,张银兵,等.一种多基地声纳的联合估计定位算法[J].鱼雷技术,2009,17(2):33-36.

- [4] 王彪,李宇,黄海宁.水声传感器网络目标协同定位方法研究[J].系统仿真学报,2009,21(19):6174-6177.
- [5] 黄晓利,王福豹,段渭军,等.无线传感器网络 TDOA 测距误差分析与校正 [J]. 计算机测量与控制,2008,16(7):1053-1056.
- [6] OMOLOGO M, SVAIZER P. Use of the crosspower - spectrum phase in acoustic event location[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1997,5(3):288-292.
- [7] 程萍,陈建峰,马驰,等.十字阵短时宽带声源实时定向算法[J].应用声学,2012,31(1).

(收稿日期:2012-01-15)

作者简介:

张竹,男,1987年生,硕士,主要研究方向:信号与信息处理。

陈建峰,男,1964年生,教授,主要研究方向:数字信号处理。

程萍,女,1986年生,硕士,主要研究方向:阵列信号处理。