

## 周期运动声源的双阵列定位\*

张炳文, 郑 坚, 熊 超

(军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:**针对常用的运动声源定位方法存在计算量较大或测试难度大的问题,提出一种基于阵列信号短时处理的运动声源定位方法。分析单、双五元十字阵列的定位性能,并基于单阵列的高精度定向能力,借鉴波束形成中帧处理思想,使用双阵列方位交叉的方法实现声源运动定位。使用自行火炮的发动机周期噪声作为模拟声源,进行外场定位实验,对参与短时相关数据的截取原则和传播路径补偿进行研究。实验结果表明,该方法能够有效实现周期声源的运动定位,最大相对误差保持在5%的水平。

**关键词:**阵列信号处理;双阵列;相关;运动声源;定位

**中图分类号:** TB533    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2017)01-174-08

## Locating method of moving periodic sound source with double-array

ZHANG Bingwen, ZHENG Jian, XIONG Chao

(Department of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of intensive calculation and difficulty in testing with common methods of moving sound source locating, a locating method based on array signal processing was proposed. Locating ability of single and double five-element cross array were analyzed. Based on the high performance of direction estimating with single array, location of moving sound source was achieved by the double arrays crossing method according to the thought of frame processing in beamforming. Locating experiment was carried out when using engine noise of self-propelled vehicle as simulated source. Then the length selection of short correlation and compensation of moving path were studied. Experiment shows that the method is effective for moving sound source locating with high precision, maximum relative error stays below level of 5%.

**Key words:** array signal process; double-array; correlation; moving sound source; locating

随着声学探测技术的迅猛发展,自行火炮的运转噪声已经成为战场侦测的重要部分,在进行阵地集结和战略转移时,十分容易被声学设备探测并锁定,生存能力受到了较大威胁。因此,展开自行火炮的运动噪声定位,对提高我军的声学侦察及反侦察能力具有十分重要的意义。

与汽车相比,自行火炮的行驶噪声主要来源是排气系统和履带系统,且排气噪声远大于履带噪声。因此,选取自行火炮的排气噪声作为其运动定位的目标噪声源。目前通常采用的运动车辆噪声定位方法主要有近场声全息法、波束形成方法和阵列信号处理方法等<sup>[1]</sup>。其中,近场声全息方法通过运用移动框架<sup>[2-3]</sup>和相对坐标补偿<sup>[4-5]</sup>的方法,测试精度和还原程度都很高。但是其对测试距离和传感器间距的要求很高,一般应用于小尺寸的低频静止声场。波束形成方法<sup>[6]</sup>能够

进行远场的高频声场测量,主要思想类似于摄像机,对每一帧短时数据进行处理,计算量很大,同时存在虚假声源和鬼影等。而基于阵列信号处理技术的运动声源定位方法<sup>[7-8]</sup>由于仅对声源处一维信号进行计算即可,无须对整个声源平面进行反演,计算量小,且定位精度较高,较为适合应用于自行火炮噪声的运动定位。

### 1 单阵列测量分析

#### 1.1 测量原理

由于自行火炮是地面行驶,在空间高度上保持恒定,且和阵列传感器高度基本保持在同一水平面,故忽略俯仰角,仅在阵列平面内进行测量。选取定向性能较好的五元十字阵作为基本阵型<sup>[9]</sup>,阵列分布如图1所示。

在阵列所在平面建立坐标系,中心传感器 $M_1$

\* 收稿日期:2015-12-21

项目基金:国家自然科学基金资助项目(51305454)

作者简介:张炳文(1987—),男,山东青岛人,博士研究生,E-mail:bingwengongtuan@163.com;

郑坚(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhengjian62@yahoo.com.cn

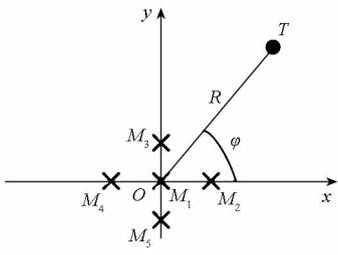


图1 五元十字阵模型图

Fig.1 Model of five-elements cross array

位于原点  $O(0,0)$ , 四个探测传感器位于坐标轴上, 其坐标分别为  $M_1(0,0), M_2(D,0), M_3(0,D), M_4(-D,0), M_5(0,-D)$ 。设  $t$  时刻声源位置为  $T(x,y)$ , 到  $O$  的距离为  $R$ , 连线  $OT$  与  $X$  轴夹角为  $\varphi$ 。声信号到达各探测与中心传感器的时延为  $\tau_{1i}$ , 距离差为  $d_{1i} (i=2,3,4,5)$ , 则有:  $d_{1i} = c \times \tau_{1i}$  ( $c$  为即时声速), 根据几何关系可得:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ (x - D)^2 + y^2 = (R + d_{12})^2 \\ x^2 + (y + D)^2 = (R + d_{13})^2 \\ (x + D)^2 + y^2 = (R + d_{14})^2 \\ x^2 + (y - D)^2 = (R + d_{15})^2 \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行求解得:

$$\begin{cases} x = \frac{2R(d_{14} - d_{12}) + d_{14}^2 - d_{12}^2}{2D} \\ y = \frac{2R(d_{13} - d_{15}) + d_{13}^2 - d_{15}^2}{2D} \end{cases} \quad (2)$$

将  $\begin{cases} x = R \cos \varphi \\ y = R \sin \varphi \end{cases}$  代入可得:

$$\begin{cases} \tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{(\tau_{15} - \tau_{13}) [2R - c(\tau_{15} - \tau_{13})]}{(\tau_{14} - \tau_{12}) [2R - c(\tau_{14} - \tau_{12})]} \\ R = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{4D^2 - d_{12}^2 - d_{13}^2 - d_{14}^2 - d_{15}^2}{2(d_{12} + d_{13} + d_{14} + d_{15})} \end{cases} \quad (3)$$

由于  $R \gg c \times \tau_{1i}$ , 可得:

$$\tan \varphi \approx \frac{(\tau_{15} - \tau_{13})}{(\tau_{14} - \tau_{12})} \quad (4)$$

则式(3)可简化为:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \left( \frac{\tau_{15} - \tau_{13}}{\tau_{14} - \tau_{12}} \right) \\ R = (4D^2 - c^2 \sum_{i=2}^5 \tau_{1i}^2) / 2c \sum_{i=2}^5 \tau_{1i} \end{cases} \quad (5)$$

式(2)和式(5)即为两种坐标形式下的声源位置表达, 因此, 在单阵列测量中, 获取每个探测传感器和中心传感器的时间延迟, 即可确定声源位置。

### 1.2 测量精度分析

由式(2)和式(5)可知, 单阵列测量受到声速

$c$ 、阵列尺寸  $D$  和时延估计误差  $\sigma_\tau$  的影响, 且当阵列模型和测试条件确定后,  $c$  和  $D$  也随之确定。因此, 时延估计精度对测量性能起到关键作用。由于传感器性质基本相同, 可设单阵列中时延估计的标准偏差相等, 即  $\sigma_\tau = \sigma_{\tau_{12}} = \sigma_{\tau_{13}} = \sigma_{\tau_{14}} = \sigma_{\tau_{15}}$ 。

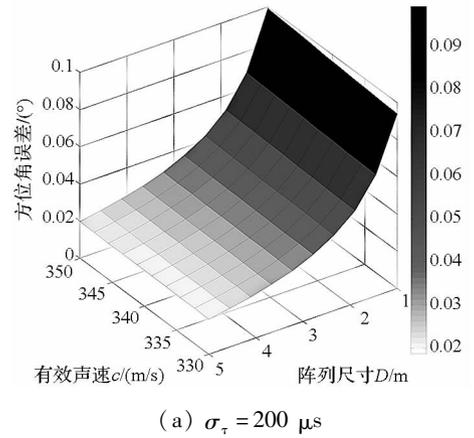
由于声源位置的  $(x, y)$  坐标表达含有二次函数, 误差传递烦琐, 且不能直观地表达误差分布, 所以在阵列定位精度分析中, 将研究对象从测量结果的坐标表示转换成声源方位角和测试距离的角坐标表示形式。

由文献[10]可知单阵列的测量误差分布为:

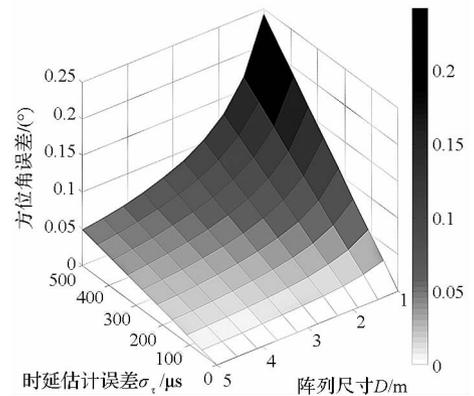
$$\begin{cases} \sigma_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_i} = \frac{\sqrt{2}c}{D} \sigma_\tau \\ \sigma_R = \frac{\partial R}{\partial \tau_i} = \frac{4vR \sqrt{D^2 + R^2}}{3D^2} \sigma_\tau \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 单阵列的测量精度受到有效声速  $c$ 、阵列尺寸  $D$ 、探测距离  $R$  和时延估计误差  $\sigma_\tau$  等多个因素的影响。

首先, 对单阵列的定向精度进行分析。当采样频率为 5 kHz 时, 采样间隔为 200  $\mu\text{s}$ 。取常温声速  $c = 343 \text{ m/s}$  或时延估计误差  $\sigma_\tau$  为一个采样间隔作为分析常量, 可得方位角误差的分布, 如图 2 所示。



(a)  $\sigma_\tau = 200 \mu\text{s}$



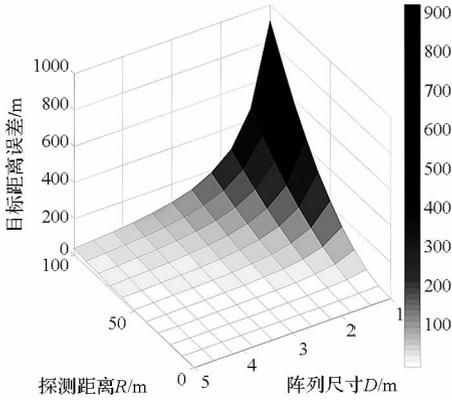
(b)  $c = 343 \text{ m/s}$

图2 方位角误差分布

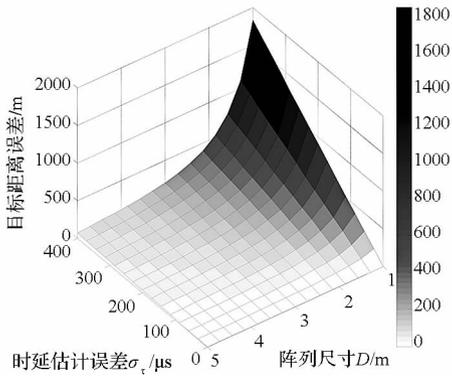
Fig.2 Distribution of azimuth error

从图 2(a) 可以得出方位角误差  $\sigma_\varphi$  随声速  $c$  的增大而增大, 呈正线性关系; 随阵列尺寸  $D$  的增大呈反函数衰减, 当  $D$  大于 2 m 时误差的衰减程度减小, 基本保持在  $0.03^\circ$  的水平。由图 2(b) 可知, 方位角误差随着  $\sigma_\tau$  的增大呈正线性增长; 随  $D$  的增大而减小, 在  $D > 2$  m 时基本保持在  $0.1^\circ$  的水平。

对探测距离的精度分析与方位角分析相同, 只是增加了探测距离  $R$  的影响。设定声速为  $c = 343$  m/s 恒定, 取探测距离  $R = 100$  m 或时延估计误差  $\sigma_\tau$  为一个采样间隔作为分析常量, 可得探测距离误差的分布, 如图 3 所示。



(a)  $\sigma_\tau = 200 \mu\text{s}$



(b)  $R = 100$  m

图 3 探测距离误差分布

Fig. 3 Distribution of range error

由图 3(a) 可知, 单阵列的定距误差较大, 分布趋势随探测距离  $R$  的增大而增大, 随  $D$  的增大而减小。但是总体上误差很大, 在最优条件下的误差几乎为 40%, 最大误差是测试距离的 9.5 倍; 图 3(b) 基本与之类似, 但是误差量级更大, 最小误差约为探测距离的 50%, 最大误差达到了探测距离  $R$  的近 20 倍。

综上所述, 以五元十字阵为基本阵型的单阵列, 定向精度很高, 在条件选择合理的情况下, 最大定向误差小于  $0.1^\circ$ ; 而定距精度很差, 最小误

差约为 40%, 无法实现声源的定位, 需改进。

## 2 双阵列定位分析

### 2.1 定位原理

单阵列分析表明其定向精度很高, 可直接确定声源方向。但定距精度很低, 无法实现定位。因此, 利用其定向能力, 增加一个阵列, 使用双阵列方位交叉的方法实现定位。

设置图 1 中单阵列为阵列 1。在其基础上, 增加一个五元十字阵为阵列 2, 中心传感器  $M'_1$  位于  $x$  轴, 坐标为  $(L, 0)$ , 探测传感器布置同阵列 1。声源  $T$  到  $O$  的距离为  $R$ , 连线  $OT$  与  $x$  轴夹角为  $\varphi_1$ ,  $O_1T$  与  $x$  轴夹角为  $\varphi_2$ 。声信号到达阵列 2 中各传感器的时延为  $\tau'_{1i}$ , 距离差为  $d'_{1i}$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ ), 则  $d'_{1i} = c \times \tau'_{1i}$ 。双阵列模型如图 4 所示。

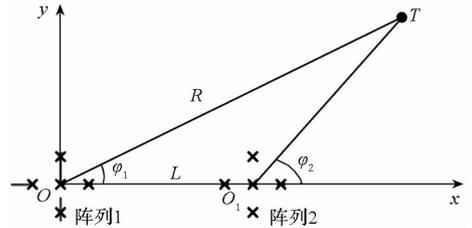


图 4 双阵列模型图

Fig. 4 Model of double-array

由于两个阵列模型相同, 由式(4)可得:

$$\begin{cases} \tan\varphi_1 \approx \frac{(\tau_{15} - \tau_{13})}{(\tau_{14} - \tau_{12})} \\ \tan\varphi_2 \approx \frac{(\tau'_{15} - \tau'_{13})}{(\tau'_{14} - \tau'_{12})} \end{cases} \quad (7)$$

由模型中阵列的相互关系可知:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{y}{x} = \tan\varphi_1 \\ k_2 = \frac{y}{x-L} = \tan\varphi_2 \end{cases} \quad (8)$$

化简后可得双阵列的声源定位表达式为:

$$\begin{cases} x = \frac{Lk_2}{k_2 - k_1} \\ y = \frac{Lk_1k_2}{k_2 - k_1} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \varphi = \arctan k_1 \\ R = \frac{Lk_2 \sqrt{1+k_1^2}}{k_2 - k_1} \end{cases} \quad (10)$$

则式(9)和式(10)即为双阵列定位的声源坐标表达式, 因此在实际应用中只需要确定阵列间距  $L$  和两个阵列中传感器之间的时间延迟即可实现定位。

### 2.2 定位精度分析

由式(6)、式(9)、式(10)可知,双阵列定位在单阵列的基础上增加了一个影响因素  $L$ ,但时延估计精度同样起到关键作用。由于阵列 1、阵列 2 采集条件基本相同,可设两阵列时延估计的标准偏差相等,即  $\sigma_\tau = \sigma_{\tau 12} = \sigma_{\tau 13} = \sigma_{\tau 14} = \sigma_{\tau 15} = \sigma'_{\tau 12} = \sigma'_{\tau 13} = \sigma'_{\tau 14} = \sigma'_{\tau 15}$ 。

由于在双阵列定位中,方位角由阵列 1 确定,定向精度已经在前文进行了分析。此处仅对双阵列的定距精度进行分析。由式(9)可知双阵列的定距精度  $\sigma_R$  主要受到方位角精度  $\sigma_\varphi$  和阵列间距  $L$  的影响,且两个因素都是相互独立的,因此需要分别对两者对定距精度的影响进行分析。

结合误差传播理论,方位角精度对距离精度的影响可表示为:

$$\sigma_R^\varphi = \frac{\partial R}{\partial \tau_i} = \frac{\partial R}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_i} = \left( \frac{\partial R}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial R}{\partial \varphi_2} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_i} \quad (11)$$

将式(10)对  $\varphi_1, \varphi_2$  的偏导和式(6)代入式(11)得:

$$\sigma_R^\varphi = \frac{\sqrt{2}cL[\sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \sec\varphi_1 \cos\varphi_2]}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \sigma_\tau \quad (12)$$

由于式(12)中含有较为复杂的三角函数,且可能解无穷大,因此需要进行一定的处理。对模型图中  $\Delta TO_2 O_1$  应用正弦定理得:

$$\frac{\sin \angle TO_2 O_1}{R} = \frac{\sin \angle O_2 TO_1}{L} \quad (13)$$

$$\frac{\sin \varphi_2}{R} = \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{L} \quad (14)$$

$$R = \frac{L \sin \varphi_2}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (15)$$

对式(15)求偏导可得:

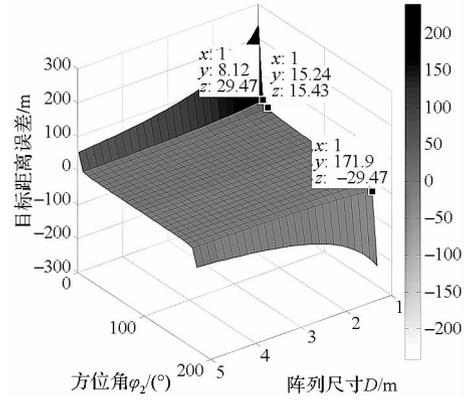
$$\sigma_R^\varphi = \frac{\sqrt{2}cL \cos \varphi_2}{D \sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \sigma_\tau \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)化简得:

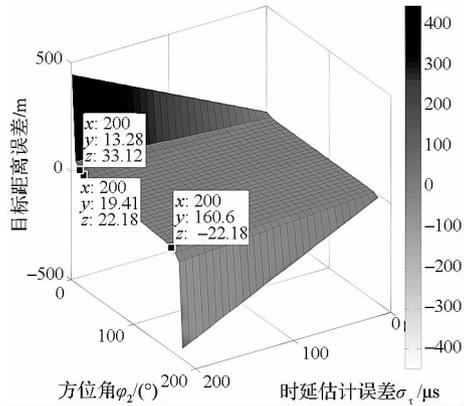
$$\sigma_R^\varphi = \frac{\sqrt{2}cR}{D \tan \varphi_2} \sigma_\tau \quad (17)$$

式(17)即为距离误差  $\sigma_R^\varphi$  的表示式。由此可知距离精度受到有效声速  $c$ 、阵列尺寸  $D$ 、阵列 2 方位角  $\varphi_2$  和时延误差  $\sigma_\tau$  以及探测距离  $R$  的影响。对其进行精度分析,即可得出在不同  $D, \varphi_2, R$  和  $\sigma_\tau$  下的距离误差。图 5(a) 为  $R = 100 \text{ m}, c = 343 \text{ m/s}, \sigma_\tau = 200 \text{ } \mu\text{s}$  时的距离误差;图 5(b) 为  $D = 2 \text{ m}, R = 100 \text{ m}, c = 343 \text{ m/s}$  时距离误差。

对图 5(a) 进行分析可知,距离误差受到方位角  $\varphi_2$  的影响较大。当方位角  $\varphi_2$  处于  $[1^\circ, 20^\circ]$  及  $[160^\circ, 179^\circ]$  的范围内误差很大;在  $[1^\circ, 10^\circ]$  及



(a)  $R = 100 \text{ m}$



(b)  $D = 2 \text{ m}$

图 5 距离误差分布

Fig. 5 Distribution of range error

$[170^\circ, 179^\circ]$  范围内误差急剧增大,最小的误差达到 28 m,相对误差 30%;在  $[10^\circ, 20^\circ]$  及  $[170^\circ, 179^\circ]$  范围内趋于平缓。当方位角处于  $[20^\circ, 160^\circ]$  范围内,误差较小,总体的误差小于 5%。而阵列尺寸对精度的影响相比较而言没有那么剧烈。图 5(b) 表明距离误差同样受到方位角  $\varphi_2$  的影响较大,受到时延估计误差的影响较小,且分布规律和图 5(a) 类似。

由于阵列间距  $L$  是与时间  $t$  无关的参量,则  $L$  对定距精度  $\sigma_R$  的影响如下:

$$\sigma_R^L = \frac{\partial R}{\partial L} \quad (18)$$

将式(10)按式(18)求偏导可得:

$$\sigma_R^L = \frac{k_2 \sqrt{1+k_1^2}}{2(k_2-k_1)} = \frac{k_2 k_1 \sqrt{1+\frac{1}{k_1^2}}}{2(k_2-k_1)} \quad (19)$$

将式(9)代入式(19)得:

$$\sigma_R^L = \frac{y \sqrt{1+\frac{1}{k_1^2}}}{2L} \quad (20)$$

由几何关系可知:

$$\begin{cases} y = R \sin \varphi_1 \\ k_1 = \tan \varphi_1 \end{cases} \quad (21)$$

代入式(17)并进行化简可得:

$$\sigma_R^L = \frac{R}{L} \quad (22)$$

式(22)即为阵列间距  $L$  对定距精度的影响表达式,因此精度受到  $R$  和  $L$  的共同作用,相对定距误差为  $1/L$ ,即理论上  $L$  确定后相对定距误差恒定。当  $L \geq 15$  m 时,相对定距误差小于 6.67%。误差分布规律如图 6 所示。

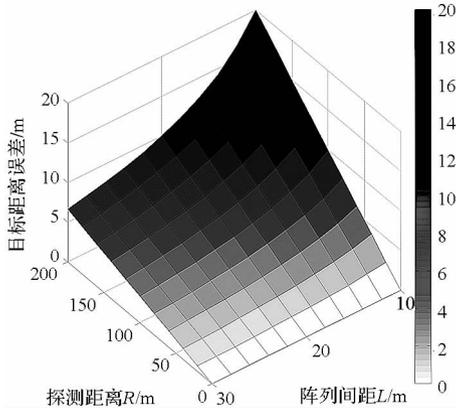


图 6 距离误差分布

Fig. 6 Distribution of range error

由图 6 可知,阵列间距  $L = 10$  m 时,最大的距离误差在距离  $R = 100$  m 时达到了 10 m,相对误差约为 10%;而在  $L = 15$  m 时,相对的距离误差小于 7%。

综合上述分析,双阵列定位性能总体上较好:在  $D = 2$  m,  $R = 100$  m 和  $L = 15$  m 时大部分定位范围内距离误差  $\sigma_{R_{max}}$  小于 5 m,相对误差小于 7%;而方位角误差  $\sigma_\phi$  基本保持在  $0.2^\circ$  及更低的水平。在  $c$  既定的情况下,  $D$  和  $L$  对于各项指标均有一定的影响,增大  $D$  和  $L$ ,可以减小  $\sigma_\phi$  和  $\sigma_R$ ,有利于提高定位精度,但同时会增加试验的复杂程度以及试验成本,应根据实际的条件合理选择。

### 3 实验及结果处理

#### 3.1 试验过程简述

运动声源实验选择在室外开阔的场地进行,室外温度为  $20^\circ\text{C}$ ,即时声速为  $c = 343$  m/s。传声器阵列按照图 4 模型进行布置。从硬件条件出发,确定两个阵列中心传感器的距离  $L = 15$  m,阵列尺寸  $D = 2$  m。由于使自行火炮保持直线匀速行进难度较大,故使用某自行火炮发动机为  $r = 1200$  r 时采集到的声信号作为声源,使用播放设备播放进行模拟;测试距离约为 100 m,声源选取匀速直线行进。声源从 A 点匀速运动到 B 点,然

后从 B 点反向运动回到 A 点。其中, A 点坐标为  $(-28.8, 97.92)$ , B 点  $(28.8, 97.92)$ 。

#### 3.2 相关数据选择

在声源运动过程中,采集到的信号是不均匀的,且一次相关无法确定整个运动轨迹。因此,需要在一定的时间间隔重复选取数据进行短时相关处理来完成运动轨迹的定位。

每次短时相关过程中,参与相关的数据量最少应该包括一个完整的信号周期,才能保证其有效性。由于自行车运动速度远小于声速,马赫数  $Ma \ll 1$ ,故忽略多普勒效应带来的频率变化。假设采集到的噪声信号频率为  $f$ ,则该信号的周期  $T = 1/f$ 。由于定位方法中两个阵列的方位确定是相互独立的,故仅需对单个阵列中传声器之间的时间差进行计算。同一波前信号在单个阵列中传声器之间运动的最远距离为  $2D$ ,则最大传播时间为  $2D/c$ 。假设实验时使用的采样率为  $F$ ,则采样间隔为  $T_N = 1/F$ 。因此,每个短时相关过程中数据点长度  $n$  应为:

$$n \geq \frac{1/f + 2D/c}{1/F} \quad (23)$$

式(23)仅给出了每次短时相关过程中的理论最短数据长度,实际定位中数据长度的确定还需要结合实测信号进行进一步研究。

#### 3.3 传播时差补偿

由于基于双阵列的定位方法的定位对象是远距离测量的声源,这就导致了实际信号和采集信号之间存在一定的传播时间差,在声源静止定位中可以忽略。但声源是处于运动状态下的,计算过程中使用的信号实际上是声源在一定时差之前发出的信号,进而影响到声源的定位精度。

设某时刻  $t$  时,声源运动到  $x(t)$  的位置,此时对声源进行运动定位,使用的相关信号  $s(t)$  实际上是声源在距离  $r$  之前的位置  $x(t_0)$  的位置发出的,此时相关后确定的声源位置实际是  $x(t_0)$  的位置,如图 7 所示,需要进行一定的补偿修正。

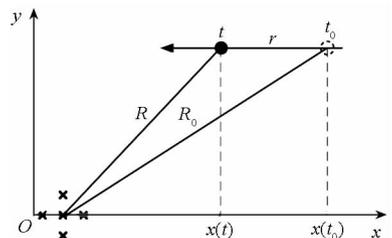


图 7 声源运动示意图

Fig. 7 Moving path of sound source

图 7 的数学描述如下:

$$\begin{cases} R_0 = \sqrt{x(t_0)^2 + y(t_0)^2} \\ R = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \\ r = |x(t_0) - x(t)| = vR_0/c \end{cases} \quad (24)$$

从图中可以清楚地得到  $t$  时刻声源的实际位置和通过测试得到位置的关系。在实际定位中,坐标  $[x(t_0), y(t_0)]$ 、声源速度  $v$  和声速  $c$  都是可以得到的,即修正量  $r$  是可求的。在实际声源定位中,对测试位置进行修正,可以得到更加准确的定位结果。

### 3.4 实验结果分析

在正向实验中,声源按照 A→B 的路径运动,运动距离  $S = 57.6 \text{ m}$ ,运动时间  $t = 45.6 \text{ s}$ ,采样长度为  $N = 228\ 000$ 。假设模拟声源为点声源,将运动距离和时间平均分成 11 份,对每个节点位置进行定位,即可实现声源的运动定位。每个节点的位置、运动时间和对应的数据点如表 1 所示。

表 1 正向运动节点信息

Tab. 1 Point information of moving forward

序号	坐标/m	运动时间/s	数据点
1	(-23.56, 97.92)	4.15	20 727
2	(-18.33, 97.92)	8.30	41 454
3	(-13.09, 97.92)	12.45	62 181
4	(-7.85, 97.92)	16.60	82 908
5	(-2.62, 97.92)	20.75	103 635
6	(2.62, 97.92)	24.90	124 362
7	(7.85, 97.92)	29.05	145 089
8	(13.09, 97.92)	33.20	165 816
9	(18.33, 97.92)	37.35	186 543
10	(23.56, 97.92)	41.50	207 270

对采集到的信号进行频率分析,如图 8 所示。

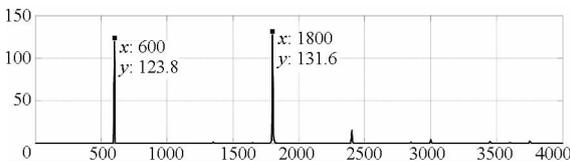


图 8 噪声信号频谱

Fig. 8 Frequency spectrum of noise signal

由图 8 中可以明显看出采集到的信号基频约为  $f = 600 \text{ Hz}$ ,在基频  $600 \text{ Hz}$  的基础上还存在一定的倍频成分。结合 3.2 节,由信号的基频可知噪声信号的周期为  $T = 1/f \approx 1666 \mu\text{s}$ ;同一波前信

号在阵列中传声器运动的最大传播时间为  $2D/c \approx 11.66 \text{ ms}$ ,因此最短数据时间长度应大于  $1.168 \text{ ms}$ 。同时实验选取的采样率为  $5 \text{ kHz}$ ,采样间隔为  $200 \mu\text{s}$ ,所以在单次相关过程中,最短的数据点个数  $n$  应该大于 59。

选取第一个定位点进行定位,对单次相关数据应该选取的长度进行分析:以第 20 727 个数据点为中心,选取阵列 1 中传声器 1、传声器 2 的采集信号,分别选取数据长度  $n$  为 30, 60, 65, 70, 100, 300 时,截取出待相关信号,进行 100 倍采样条插值后,进行相关处理,相关曲线如图 9(a) 所示。

经 100 倍插值后,采样率升高为  $500 \text{ kHz}$ ,采样间隔为  $2 \mu\text{s}$ 。由图中曲线最大值位置可知:当采样长度  $n = 30$  时,相关曲线的中心  $N = 3000$ ,则信号延迟  $\tau_{n=30} = (3223 - 3000) \times 2 = 446 \mu\text{s}$ ;同理可得不同采样长度时的信号延迟量,如图 9(b) 所示。

对图 9(b) 进行分析可知,当  $n \leq 60$  时,相关获取的时间延迟量有较大随机性,变化剧烈,不能准确反映信号到达两个传感器的运动时间延迟;当  $n \geq 65$  时,获取的信号延迟量有轻微波动,但是趋势稳定,基本保持在  $520 \mu\text{s}$  的水平,说明该水平即为正确的时间延迟量。

不同数据长度的定位结果如表 2 所示。

对表 2 中数据进行分析可知,当单次相关数据长度  $n \leq 60$  时,定位结果误差很大,无法实现定位。当  $n \geq 65$  时,定位结果基本分布在实际坐标附近,能够较为准确地实现声源点定位。

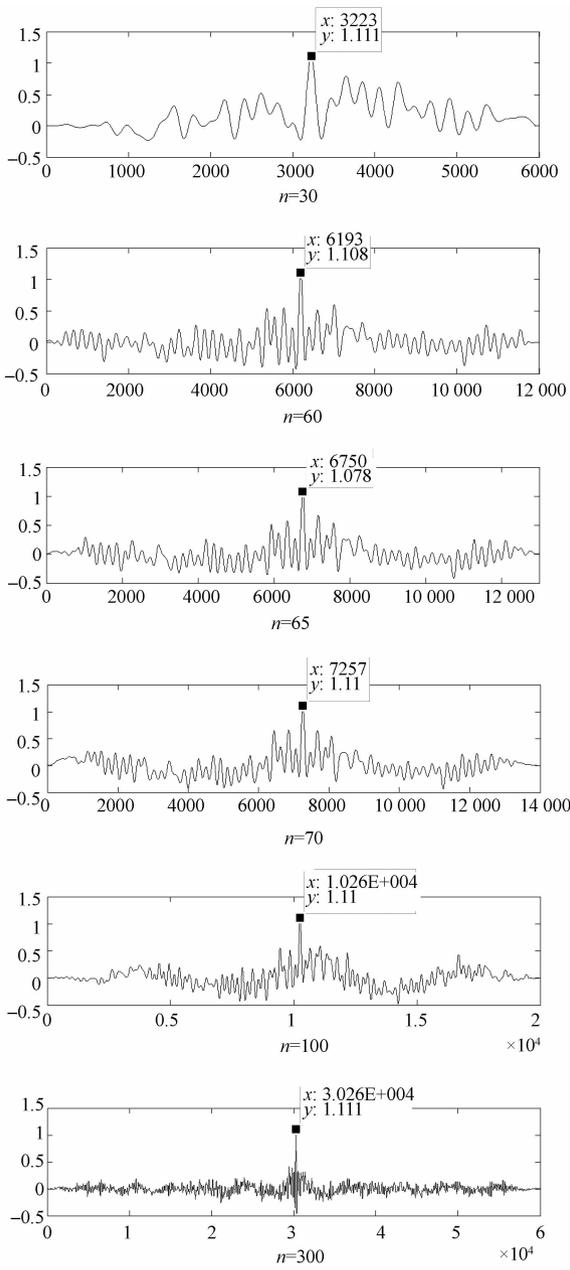
因此,在后续处理中的数据长度初步确定为  $n = 65$ ,并在截取数据后进行样条插值,提高采样率,减小采样间隔,提高时延估计的精度。

对所有实验数据进行处理,并结合 3.3 节,确定修正量  $r$ ,对定位结果进行修正,定位结果如表 3 所示;两个方向的运动轨迹如图 10 所示。

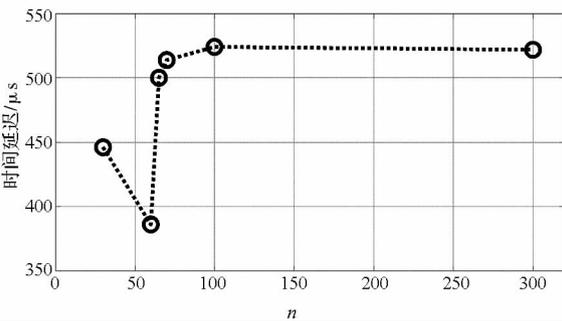
对表 3 和图 10 中数据进行分析可知,定位实验较为准确地确定了运动声源的节点位置,且测试位置 and 实际位置的绝对距离误差均相对较小,轨迹曲线也基本重合。

数据结果和轨迹图能够从一定程度上反映出双阵列的定位能力,但并不十分直观。同时由于理论部分是以方位角和距离为研究对象,现将表 3 中坐标形式的定位结果变成角坐标的形式,并进行误差分析,如图 11 所示。

结合前文误差分析及图 11 可知,实测定位误差总体较小:方位角误差均小于 2%,最小误差几



(a) 相关曲线  
(a) Correlation curve



(b) 信号延迟  
(b) Delay of signal

图 9 不同数据长度的相关性能

Fig. 9 Relative performance with data of different length

表 2 不同长度数据定位结果

Tab. 2 Locating result of different lengths

n	实际坐标	测试坐标
30		(18.24, 52.31)
60		(6.79, 7.34)
65	(-23.56, 97.92)	(-24.36, 92.95)
70		(-24.35, 92.70)
100		(-24.20, 92.80)
300		(-24.07, 92.17)

表 3 运动定位结果

Tab. 3 Locating result of moving source

序号	实际坐标/m	测试坐标/m	
		A→B	B→A
1	(-23.56, 97.92)	(-24.01, 92.82)	(-23.65, 98.29)
2	(-18.33, 97.92)	(-19.44, 94.33)	(-18.24, 96.86)
3	(-13.09, 97.92)	(-14.29, 94.62)	(-15.85, 99.70)
4	(-7.85, 97.92)	(-9.75, 98.12)	(-9.55, 98.38)
5	(-2.62, 97.92)	(-4.58, 101.67)	(-3.38, 98.15)
6	(2.62, 97.92)	(1.33, 98.53)	(2.81, 96.97)
7	(7.85, 97.92)	(6.39, 96.68)	(8.70, 97.28)
8	(13.09, 97.92)	(11.06, 93.80)	(13.68, 95.85)
9	(18.33, 97.92)	(16.61, 95.15)	(19.27, 96.00)
10	(23.56, 97.92)	(21.58, 94.49)	(25.04, 95.39)

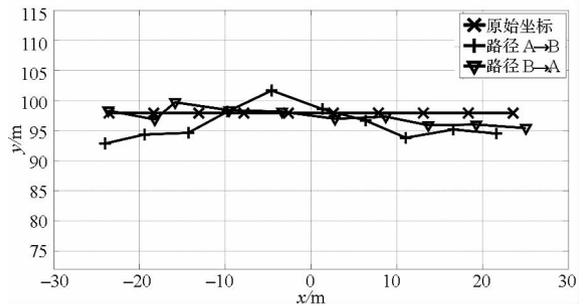


图 10 声源原始及测试轨迹

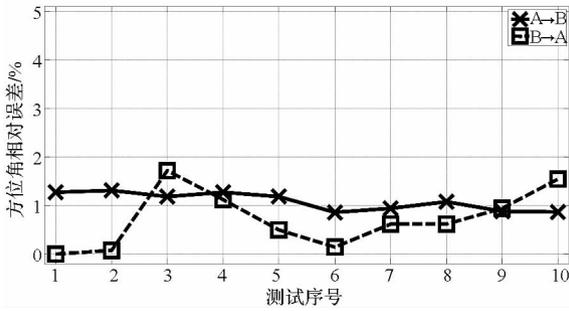
Fig. 10 Original and tested path of source

乎为零,接近理论精度;距离误差相对要大一些,但是最大误差为 4.9%,甚至小于理论精度分析中的 6.67%,定位效果较好。

综上所述,双阵列的运动声源定位方法能够有效实现声源的运动定位,且定位精度较高。

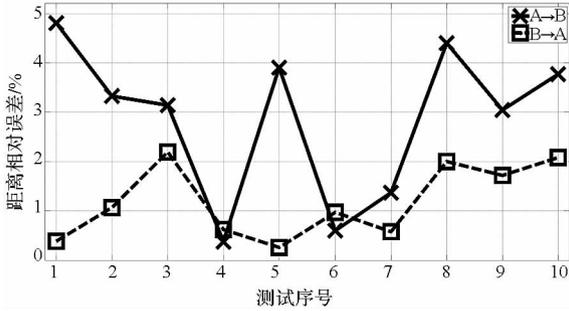
### 4 结论

本文提出了一种基于阵列信号短时处理的运动声源定位方法。采用双阵列交叉定位方法,并



(a) 方位角相对误差

(a) Relative error of azimuth



(b) 距离相对误差

(b) Relative error of range

图 11 相对定位误差分布

Fig. 11 Distribution of relative locating error

借鉴波束形成方法中帧处理的思想,对阵列信号进行短时相关处理。对双阵列的定位性能进行了误差仿真分析。使用自行火炮的发动机噪声信号模拟运动声源,对短时相关过程中数据长度的选择进行了研究。外场实验结果表明:该方法能够有效地实现周期运动声源的定位,定位精度较高,最大相对误差基本保持在 5% 以下的水平。但本文采用的是模拟声源,并且是建立在点声源假设和低速运动的前提下,忽略了声源运动时噪声的特性变化,对于实际声源的运动定位,还需要进行进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] Schulte-Werning B, Jager K, Strube R, et al. Recent developments in noise research at Deutsche Bahn (noise assessment, noise source localization and specially monitored track) [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(3): 689-699.

[2] Park S H, Kim Y H. An improved moving frame acoustic holography for coherent band limited noise [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(6): 3179-3189.

[3] 陈梦英, 商德江, 李琪, 等. 运动声源的边界元声全息识别方法研究[J]. 声学学报, 2011, 36(5): 489-495.  
CHEN Mengying, SHANG Dejiang, Li Qi, et al. Nearfield acoustic holography based on inverse boundary element method for moving sound source identification [J]. Acta Acustica, 2011, 36(5): 489-495. (in Chinese)

[4] 罗禹贡, 杨殿阁, 郑四发, 等. 基于近场声全息理论的运动声源动态识别方法[J]. 声学学报, 2004, 29(3): 226-230.  
LUO Yugong, YANG Diange, ZHENG Sifa, et al. Dynamical moving sound source identification method based on the NAH[J]. Acta Acustica, 2004, 29(3): 226-230. (in Chinese)

[5] 杨殿阁, 何长伟, 王子腾. 基于时域非简化模型的运动声源定量测量方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(4): 562-566, 572.  
YANG Diange, HE Changwei, WANG Ziteng. Quantitative measurement method for a moving sound source based on a non-simplified time domain model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(4): 562-566, 572. (in Chinese)

[6] 毛晓群, 罗禹贡, 杨殿阁, 等. 使用阵列技术识别高速行驶轿车的辐射声源[J]. 汽车技术, 2003(9): 6-9.  
MAO Xiaoqun, LUO Yugong, YANG Diange, et al. Application of the array technology in identification of radiated noise sources of passenger car running at high speed [J]. Automobile Technology, 2003(9): 6-9. (in Chinese)

[7] 褚志刚, 杨洋, 王卫东, 等. 基于波束形成方法的货车车外加速噪声声源识别[J]. 振动与冲击, 2013, 21(7): 66-70.  
CHU Zhigang, YANG Yang, WANG Weidong, et al. Identification of truck noise sources under passby condition based on wave beamforming method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 21(7): 66-70. (in Chinese)

[8] 司春棣, 陈恩利, 杨绍普, 等. 基于声阵列技术的汽车噪声源识别试验研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 173-175.  
SI Chundi, CHEN Enli, YANG Shaopu, et al. Experimental study on noise sources identification of vehicle based on microphone array technology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 173-175. (in Chinese)

[9] 陈华伟, 赵俊渭, 郭业才. 五元十字阵被动声定位算法及其性能研究[J]. 探测与控制学报, 2003, 25(4): 11-16.  
CHEN Huawei, ZHAO Junwei, GUO Yecai. Acoustic passive localization algorithm based on a planar five-element array and its performance analysis [J]. Journal of Detection & Control, 2003, 25(4): 11-16. (in Chinese)

[10] 王昭, 李宏, 赵俊渭, 等. 空气声被动定位的误差分析[J]. 应用声学, 2000, 19(2): 39-43.  
WANG Zhao, LI Hong, ZHAO Junwei, et al. Error analysis of acoustic passive localization in the air [J]. Applied Acoustic, 2000, 19(2): 39-43. (in Chinese)