

doi: 10.7690/bgzdh.2015.06.001

弹丸落点被动声定位方法

宋 凯, 夏晨秋, 张承伟

(驻延边地区军事代表室, 吉林 敦化 133700)

摘要: 为提高目前炮兵定位以及靶场试验弹丸落点检查精度, 提出一种基于五元十字阵的双基阵定位模型。分析五元十字阵中测距、阵元间距对定位精度的影响, 介绍利用声传感器阵列的被动声定位方法, 利用三角交会法对目标进行定位并仿真分析。仿真结果表明: 基于五元十字阵的双基阵比单基阵的测距相对误差小, 能够有效提高定位精度, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 被动声定位; 五元十字阵; 双基阵; 弹丸落点

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Passive Acoustic Theory for the Localization of Bomb Falling Point

Song Kai, Xia Chenqiu, Zhang Chengwei

(The Military Representative Office of PLA in Yanbian, Dunhua 133700, China)

Abstract: For improving the accuracy of artillery and shooting range test the location of bomb falling point, the double array localization model based on five-element cross array. Analyze influence of ranging and array pitch of five-element cross array on positioning accuracy, introduce passive acoustic localization method of sonic transducer array, use triangle intersection to locate and carry out simulation analysis of object. The simulation results show that: the relative error of range using double array based on five-element cross array is smaller than the single one. The double array can improve the location accuracy, it has good engineering application value.

Keywords: passive acoustic localization; five-element cross array; double array; bomb falling point

0 引言

炮弹落点定位是常规武器试验的一项必要的工作, 也是炮兵射击时一项重要的参考依据。目前定位方法通常采用人工搜索定位, 其精度差、效率低, 易受天气、地形等环境因素影响。被动声定位技术是一种利用声学原理, 通过声传感器阵列获得声波信号, 通过处理声波信号到达不同传感器的时延, 实现对目标声源定位的技术。近年来, 基于五元十字阵的被动声定位研究较为常见^[1-6], 其定向精度较高, 但测距精度误差较大, 而且传感器阵列中阵元间距对定位的精度影响很大。笔者主要介绍五元十字阵定位算法, 对定位算法时延误差引起的定位精度误差进行分析, 进而提出一种基于五元十字阵的双基阵定位模型。通过实验仿真分析表明, 该模型能提高被动声定位精度。

1 五元十字阵定位模型

五元十字阵的阵形结构如图 1 所示, 4 个声传感器 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 距中心传感器 M_0 的距离均为 D , 以 M_0 为原点建立坐标系, 各阵元的坐标分别为 $M_0(0, 0, 0)$ 、 $M_1(D, 0, 0)$ 、 $M_2(-D, 0, 0)$ 、 $M_3(0, D,$

$0)$ 和 $M_4(0, -D, 0)$ 。假设声源目标 T 位于远场, 声波以球面波进行传播, 目标方位角为 φ , 俯仰角为 θ , 目标距声阵中心 M_0 的距离为 r , 距 M_1, M_2, M_3, M_4 传感器的距离分别为 r_1, r_2, r_3, r_4 。声波从声源 T 到达阵元 M_0 与阵元 M_i 的时间差即时延, 可表示为 $\tau_i(1 \leq i \leq 4)$, 声波到达阵元 M_0 与阵元 M_i 的距离差 $d_i=r_i-r(1 \leq i \leq 4)$, 有 $d_i=C\tau_i(C$ 为声速)。由声阵和目标的几何位置关系有:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 & (1) \\ (x - D)^2 + y^2 + z^2 = (r + d_1)^2 & (2) \\ (x + D)^2 + y^2 + z^2 = (r + d_2)^2 & (3) \\ x^2 + (y - D)^2 + z^2 = (r + d_3)^2 & (4) \\ x^2 + (y + D)^2 + z^2 = (r + d_4)^2 & (5) \end{cases}$$

将式 (1)~式 (5) 相加可得:

$$4D^2 = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + 2r(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)$$
$$r = (4D^2 - \sum_{i=1}^4 d_i^2) / (2 \sum_{i=1}^4 d_i) = \quad (6)$$

$$(4D^2 - C^2 \sum_{i=1}^4 \tau_i^2) / (2C \sum_{i=1}^4 \tau_i)$$

将式 (5)-式 (4)/(式 (3)-式 (2)) 得:

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{(d_4 - d_3)(2r + d_3 + d_4)}{(d_2 - d_1)(2r + d_1 + d_2)}$$

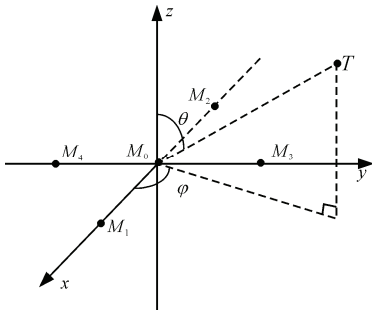


图 1 五元十字阵

考虑到目标声源位于远场, 有 $r \gg d_i$, 则可计算出目标方位角为:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{d_4 - d_3}{d_4 - d_3}\right) = \arctan\left(\frac{\tau_4 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_1}\right) \quad (7)$$

利用最小二乘法^[2], 计算目标的俯仰角为

$$\theta \approx \arcsin\left(\frac{\sqrt{(d_1 - d_2)^2 + (d_3 - d_4)^2}}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{C\sqrt{(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_3 - \tau_4)^2}}{2D}\right) \quad (8)$$

通过上述公式可以表明: 测量得到传感器之间的时间延时、声速和阵列的距离可以计算出目标声源的坐标, 即能够定位声源位置。

2 定位精度误差分析

从定位公式可见: 炸点定位的精度由声波到达不同传感器的时间差(时延)、声速 C 及传感器阵元间距 D 共同决定。由于在实际环境中, 定位精度会受到如环境温度、气压和风速等对声速测量引起误差的影响、受到传感器摆放引起的阵列尺寸误差的影响以及对时延估计误差的影响。在实际的应用中声速、阵元尺寸误差可预先给以修正和校准^[2], 笔者主要讨论时延估计误差对定位算法精度的影响。

2.1 测距误差分析

时延误差是影响定位精度的主要因素, 由于时延 $\tau_i (1 \leq i \leq 4)$ 误差统计特性相同, 假设各时延误差的标准差为 $\sigma_{\tau_1} = \sigma_{\tau_2} = \sigma_{\tau_3} = \sigma_{\tau_4} = \sigma_{\tau}$, 根据误差传播理论^[6]可知, 距离 r 的测距的标准差为:

$$\sigma_r = \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial \tau_1}\right)^2 \cdot \sigma_{\tau_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_2}\right)^2 \cdot \sigma_{\tau_2}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_3}\right)^2 \cdot \sigma_{\tau_3}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_4}\right)^2 \cdot \sigma_{\tau_4}^2} = \sigma_{\tau} \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial \tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \tau_4}\right)^2} = \frac{4rC\sqrt{D^2 + r^2}}{D^2(4 - \sin^2 \theta)} \sigma_{\tau} \quad (9)$$

根据式 (9) 可知: 在延时估计误差一定的情况下, 测距误差与目标实际距离、阵列阵元间距离和俯仰角大小有关。假设 $\sigma_{\tau} = 3 \mu\text{s}$, 风速为标准风速 $C=340 \text{ m/s}$, 而文中主要探讨炮弹落炸点的定位方法, 故设定俯仰角 $\theta=90^\circ$, 可得测距误差与阵元间距、实际测距距离的关系如图 2 所示。

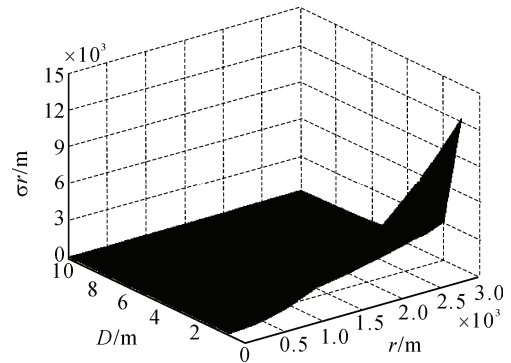


图 2 测距误差与阵元间距及测量距离变换关系

从图 2 中可以看出: 当阵元间距 D 在 $0 \sim 1 \text{ m}$ 之间变化时, 测距误差巨大; 当阵元间距 D 在 $1 \sim 4 \text{ m}$ 之间变化时, 测距误差随着测距距离的增大而极具增大; 当阵元间距 D 大于 4 m 以上时, 测距误差变化不大并趋于定值。为进一步合理选取阵元间距, 并更加直观地反映测距误差与测距、阵元间距关系, 现取 $D=1 \text{ m}$ 、 $D=2 \text{ m}$ 、 $D=4 \text{ m}$ 、 $D=8 \text{ m}$, 用二维曲线图对其关系进行描述, 如图 3 所示。

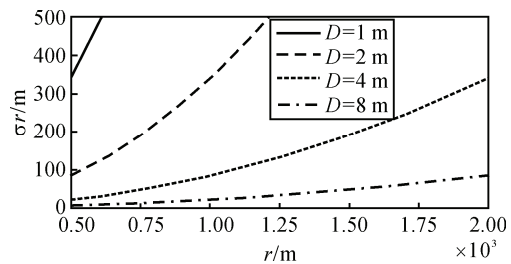


图 3 测距误差与测量距离关系曲线

图 3 为反映在特定 D 值时测量距离与测距误差之间的关系, 适当截取坐标范围。可以看出: $D=4 \text{ m}$ 时, $r=500 \text{ m}$ 对应的测距误差在 22 m 左右, 并且测距误差随着测量距离 r 的增加而增大; $D=8 \text{ m}$ 时, $r=500 \text{ m}$ 对应的测距误差为 5 m 左右, 测距误差也随着距离 r 的增加而增大, $r=2000 \text{ m}$ 时, 测距误差为测距的 4% 。为此, 在搭建传感器阵列时, 阵型阵元间距应大于 4 m , 以保证阵型有较小的测距误差, 从而提高系统整体的定位精度。

2.2 方位角误差分析

同样根据误差理论, 方位角的误差标准差为:

$$\sigma\varphi = \sigma\tau \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\tau_4}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}C}{D\sin\theta} \sigma\tau \quad (10)$$

公式 (10) 表明：在时延估计误差一定的情况下，方位角误差与阵元间距和俯仰角的大小有关。同样假设 $\sigma\tau = 3\ \mu\text{s}$ 和 $\theta=90^\circ$ ，方位角误差与阵元尺寸的关系可由如图 4 所示。

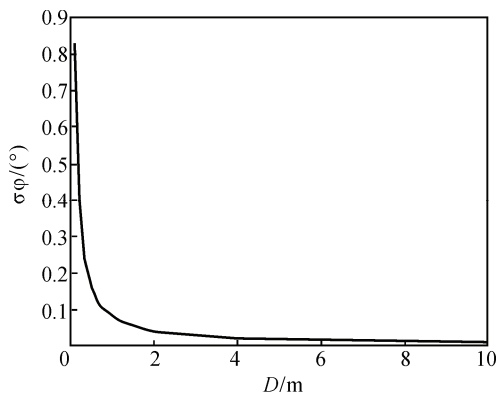


图 4 方位角误差与阵元间距关系曲线图

由图 4 可知： $\theta=90^\circ$ 时方位角误差与阵元间距成反比例关系，当阵元间距 $D \geq 1\ \text{m}$ 时，方位角误差受阵元间距影响不大，且不受测距的影响。

3 定位模型改进

单个五元十字阵定位目标声源，测距精度受到目标距离以及阵元间距的影响。特别是在阵元间距小且测距距离远时，测距估计误差较大。又由于方位角误差受阵元间距影响小且不受测距影响的特点，笔者引入双基五元十字阵。该双基阵使用每个单基阵测得的方位角，根据三角交会法计算出测距，减小测距误差。

3.1 双基阵定位模型

在坐标系中建立基于五元十字阵的双基阵模

型，如图 5 所示。

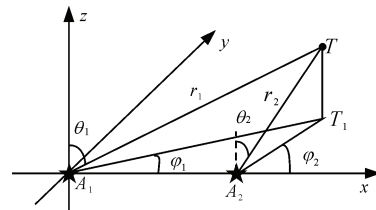


图 5 基于五元十字阵的双基阵

其中 A_1 、 A_2 为 2 个单基阵， A_1 点与原点 O 重合，每个单基阵均由 1 个独立的立体五元十字阵(如图 1) 构成，单基阵中心位置处传声器坐标分别为 $A_1(0,0,0)$ 、 $A_2(L,0,0)$ 。 T 为点状声源， T_1 为点状声源在 xy 平面的投影。 θ_1 为单基阵 A_1 测得目标声源的俯仰角， φ_1 为单基阵 A_1 测得目标声源的方位角， R_1 为点状声源到单基阵 A_1 中心处的距离； θ_2 为单基阵 A_2 测得目标声源的俯仰角， φ_2 为单基阵 A_2 测得目标声源的方位角， R_2 为点状声源到单基阵 A_2 中心处的距离。

假设每个单基阵的位置固定，阵形参数、阵元特性相同，根据公式 (7) 可得到每个单基阵测得的目标声源的方位角。根据三角形相关知识可得：

$$\frac{L}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{A_1 T}{\sin\varphi_2} \quad (11)$$

$$A_1 T = \frac{L \sin\varphi_2}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

3.2 仿真计算

为比较单基阵与双基阵的定位效果，假设某一目标声源坐标为 $T(600, 800, 0)$ ， $L=10\ \text{m}$ ，声速为理想声速，分别计算声源到达基阵 A_1 、 A_2 的理论时延，基阵间距分别设定为 $D=2\ \text{m}$ 、 $D=4\ \text{m}$ 、 $D=8\ \text{m}$ 。根据坐标关系可以计算出各基阵中相关数据如表 1、表 2 所示。

表 1 A_1 基阵传感器仿真时延

D	τ_1	τ_1 (修)	τ_2	τ_2 (修)	τ_3	τ_3 (修)	τ_4	τ_4 (修)
2	-3 525.64	-3 525	3 533.17	3 530	-4 703.76	-4 700	4 708.00	4 710
4	-7 043.73	-7 040	7 073.85	7 070	-9 403.27	-9 400	9 420.21	9 420
8	-14 057.12	-14 055	14 177.59	14 175	-18 789.43	-18 787	18 857.20	18 860

表 2 A_2 基阵传感器仿真时延

D	τ_1	τ_1 (修)	τ_2	τ_2 (修)	τ_3	τ_3 (修)	τ_4	τ_4 (修)
2	-3 487.59	-3 485	3 495.25	3 495	-4 732.05	-4 730	4 736.22	4 740
4	-6 967.48	-6 965	6 998.14	6 995	-9 459.90	-9 455	9 476.58	9 475
8	-13 904.08	-13 902	14 026.73	14 025	-18 902.97	-18 905	18 969.68	18 970

对计算出的时延进行适当修饰，模仿时延误差，再由修改后的仿真时延，根据公式 (6) 和公式 (7)

定位目标声源。应用单基阵对目标声源定位，使用表 1 基阵仿真时延数据，计算结果如表 3 所示。

表 3 A_1 基阵仿真定位计算结果 rad

D	R_1 (理论值)	R_1 (计算值)	ϕ_1 (理论值)	ϕ_1 (计算值)
2	1 000	784.81	0.927 295	0.927 465
4	1 000	941.77	0.927 295	0.927 465
8	1 000	975.44	0.927 295	0.927 384

应用双基阵模型对目标声源定位,由公式 (11) 可知,还需要计算出声源到达基阵 A_2 的方位角 ϕ_2 。使用表 2 中修改后的时延,根据公式 (7) 计算结果

如表 4。

表 4 A_2 基阵方位角计算结果 rad

D	ϕ_2 (理论值)	ϕ_2 (计算值)
2	0.935 343	0.935 626
4	0.935 343	0.935 373
8	0.935 343	0.935 443

根据公式 (11) 计算双基阵测距结果,对比单基阵与双基阵测距如表 5 所示。

表 5 2 种基阵测距对比

D	R (理论值)	$R_{\#}$ (单基阵 A_1)	$R_{\#}$ (双基阵)	$\mathcal{E}(R_{\#})/\%$	$\mathcal{E}(R_{\#})/\%$
2	1 000	784.81	986.37	21.52	1.36
4	1 000	941.77	1 017.74	5.82	1.77
8	1 000	975.44	998.72	2.46	0.36

表 5 中除给出了仿真试验测得的单基阵坐标原点与目标声源的直线距离 $R_{\#}$ 和 $R_{\#}$ 以外,还给出了实际距离与计算测量距离的相对误差 \mathcal{E} , 相对误差的公式可表述为:

$$\mathcal{E} = \frac{|\text{计算值} - \text{实际值}|}{\text{实际值}} \times 100\%$$

由表 5 可以看出:在预订测距 1 000 m 时,单基阵定位测距误差比双基阵定位测距误差大。单基阵测距误差最小为 2.46%,最大为 21.52%;双基阵测距误差最小为 0.36%,最大为 1.36%。为更清晰地观察 2 种基阵定位误差的变化趋势,以阵元间距为横坐标,相对误差的百分比为纵坐标绘制误差曲线,如图 6 所示。

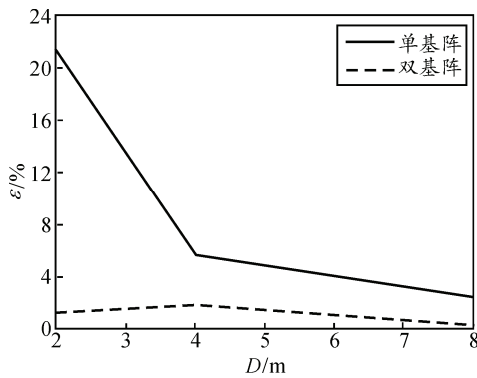


图 6 测距相对误差曲线

从试验中可以看出:单基阵的定位精度没有双基阵的定位精度高,且双基阵定位精度较为稳定。同时,单基阵阵元间距的大小直接影响定位精度,而双基阵阵元间距对定位精度的影响较小。通过适当调节构成双基阵的单基阵阵元间距参数,可以进一步提高定位精度,从而使其定位精度满足工程实际需要。

4 结束语

笔者分析了五元十字阵被动声定位算法,讨论了时延误差对测距以及定向精度的影响,对其定位性能进行了理论分析。结果表明:目标测距精度与目标距离、阵列尺寸有关,通过增大基阵的尺寸可以提高测距精度。目标定向精度与阵列尺寸有关,但定向误差受阵元间距影响不大,且定向误差不受测距的影响。进而笔者提出基于五元十字阵的双基阵定位模型,推导该模型算法,根据各个基阵测得的定向数据,利用三角交会法对目标进行定位。通过仿真实验,使用单基阵和双基阵对同一目标声源定位,在目标距离预期在 1 000 m 时,使用基阵尺寸为 2, 4, 8 m 情况下,单基阵的测距相对误差为 21.52%、5.82%和 2.46%;而使用双基阵的测距误差为 1.36%、1.77%和 0.36%。结果表明:双基阵较单基阵测距误差小,且受阵型尺寸影响不大。对于弹丸落点定位,采用双基阵被动声定位方法测距相对误差小于 2%,而定向相对误差小于 0.03%,具有较高的定位精度,能够实现弹丸落点的定位,为工程实现提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 雷鸣,陈绍钦,雷志勇. 近地炸点声定位算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012(3): 734-736.
- [2] 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(4): 11-16.
- [3] 陈维兴,张传义. 基于声学检测技术的弹着点定位系统[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 36-42.
- [4] 王宏凯,房立清,熊超. 立体五元十字阵定位算法与精度分析[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 76-77.
- [5] 王伟,倪明,杨鹏飞,等. 浅海五元十字阵被动声定位误差分析[J]. 声学技术, 2009(10): 59-60.
- [6] 王昭. 空气声被动定位的误差分析[J]. 应用声学, 1998(2): 39-40.