两种不同的声源定位算法研究

于国栋，宋永志，王春阳，张 月
(中国白城兵器试验中心，吉林白城 137001)

摘要：讨论了两种基于声信号的声源定位算法。将声传感器获取的时延差作为观测量，结合已知的声探测器阵列的空间位置和声速确定具体的声源位置。采用两种定位算法对仿真数据以及试验数据进行解算，并对其结果进行分析；验证了两种算法的准确性及各自的优缺点。结果表明，合理地使用两种算法，能够快速、精确地解算出声源的位置信息。

关键词：声源定位；时延估计算法；组合算法；定位精度
中图分类号：B845.2 Q62 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2016)-05-0467-05
DOI **编码：**10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.05.015

Research on two different sound source localization algorithms

YU Guo-dong, SONG Yong-zhi, WANG Chun-yang, ZHANG Yue
(*Baicheng Ordnance Test Center of China*, *Baicheng* 137001 , *Jilin*, *China*)

Abstract: This paper presents two different sound source localization algorithms, in which the observation data are the time differences of arrival between acoustic sensors, and then combined them with the spatial position and speed of the acoustic detector array the specific location of the sound source can be determined. Simulation and experimental data are processed by the two localization algorithms in this paper, experimental results are well analyzed to verify the accuracies of the two different algorithms and to show their advantages and disadvantages. The results show that fast and accurately solution is available with rational use of the two algorithms.

Key words: sound source localization; time delay estimation algorithm; combination algorithm; positioning accuracy

0 引 言

声源定位方法有很多种，大多是根据声波到达不同位置声传感器的时延差而确定声源的位置[1]。文中讨论了两种定位算法，第一种算法是基于时延估计定位法，将时延差作为观测值，采用最小二乘原理解算出定位结果[2]。第二种算法是在第一种算法的基础上，采用组合法解算出全部可能的解，从中剔除偏差较大的解，将偏差较小的解取平均作为最终的结果。实际测量中，误差是不可避免的，当观测值存在较大误差时，会将有害信息带入到观测方程中，使模型产生偏移，特别是声源位于传感器阵列外部时，观测值误差的影响会被放大数倍[3-4]。相比于算法一，算法二能有效利用观测数据，降低干扰，具有明显的抗差能力。采用上述两种算法可以解决大多数的声源定位问题，特别对实时声信号有较快、较强的处理能力，只要准确提取特征点时刻，便可以获取准确的声源位置坐标[5-7]。

文中采用两种定位算法对仿真数据以及正式试验数据进行解算，并对结果进行分析，验证了两种算法的实用性，分析出各自的优缺点以及适用的场合。

收稿日期：2015-11-30; **修回日期：**2016-02-20
基金项目：试验技术研究项目(12-sy14)
作者简介：于国栋(1982－)，男，辽宁大连人，硕士研究生，工程师，研究方向为弹道终点坐标测试。
通讯作者：于国栋，E-mail: daya9527@126.com

1 原 理

1.1 声源定位

利用声信号测量声源位置坐标，就是将一组声探测器布置在声源四周，接收目标着地时产生的声信号，对信号进行处理，提取出探测器间的时延差作为观测值，采用最小二乘原理进行平差，解算出结果。基于上述工作原理，我们研制了一套声源定位系统，如图 1 所示，该系统由 28 个声探测器、中心处理计算机和 4G 移动通信网络组成。其中声震波探测器包括声震传感器、信号放大器、网络通信及北斗/GPS 时间统一设备等部分，它们协同完成内部时间统一设备的精确授时、声信号放大及采集、数据传输等功能。

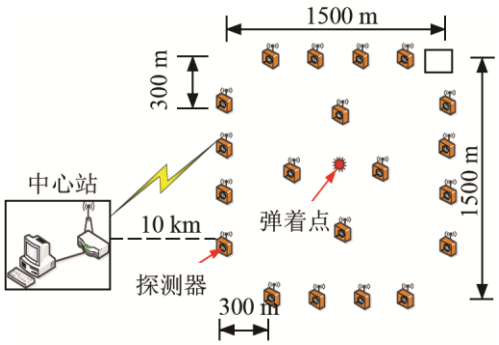


图 1 声源定位系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of sound source localization system

1.2 特征点时刻提取

图 2 为两个探测器采集的原始信号。由于目标与不同探测器之间的距离存在差异，为降低这种差异对特征点提取带来的影响，设备采用大动态范围的电路设计，每个探测器用红、绿、蓝三种颜色信号代表不同的放大倍数。图中虚线为特征点提取标尺，虚线下端的信息即特征点时刻。图 2 中，上图信号的特征点时刻为 17346.1257，下图特征点时刻为 17346.0614，相减得到时延差为−0.0643(特征点时刻为 UTC(Coordinated Universal Time)时间，单位：s)。

也可以根据互相关时延估计算法，通过计算两路信号互相关函数最大值的方式求得探测器间的时延差。

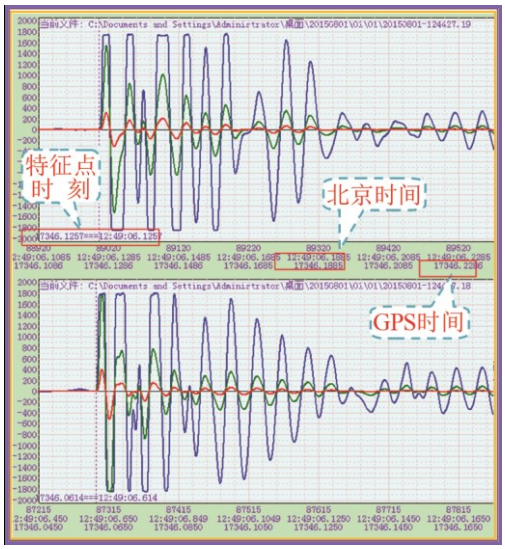


图 2 探测器采集的原始信号

Fig.2 The original signal collected by the detector

1.3 算法一

利用算法一对目标进行解算至少需要 3 个以上探测器，n 为传感器数量，传感器位置坐标分别为 $S_1(x_1,y_1)$，$S_2(x_2,y_2)$，…，$S_n(x_n,y_n)$，$S(x,y)$ 为声源出现的位置，t_1，t_2，t_3…，t_n 是传感器接收到目标特征点的时刻。取最早收到目标的特征点时刻 t_1 为基准时刻，将其他时刻与 t_1 的时延差 t_2-t_1，t_3-t_1，…，t_n-t_1 分别记为 Δt_2，Δt_3，…Δt_n，将 Δt_1 设为 0，记 t 为从目标事件发生到基准传感器接收到信号的时间，设声波传播速度为 v。通过以上关系，可以建立如下方程组[8]

$$\begin{cases}(x-x_1)^2+(y-y_1)^2=v^2(t_1+\Delta t_1)^2\\(x-x_2)^2+(y-y_2)^2=v^2(t_2+\Delta t_2)^2\\\cdots\\(x-x_n)^2+(y-y_n)^2=v^2(t_n+\Delta t_n)^2\end{cases}\tag{1}$$

对方程组(1)中的 n 个方程分别展开，然后依次相减可以得到方程组(2)：

$$\begin{cases}(x_1-x_2)x+(y_1-y_2)\,y=v^2(t_2-t_1)\,t+(L_1-L_2)\\(x_2-x_3)x+(y_3-y_3)y=v^2(t_3-t_2)t+(L_2-L_3)\\\cdots\\(x_{n-1}-x_n)x+(y_{n-1}-y_n)\,y=v^2\,(t_n-t_{n-1})\,t+(L_{n-1}-L_n)\\(x_n-x_1)x+(y_n-y_1)y=v^2\,(t_1-t_n)t+(L_n-L_1)\end{cases}\tag{2}$$

其中：$L(i)=(x_i^2+y_i^2-v^2t_i^2)/2$，$\Delta t_1=0$，$i=1,2,3,\cdots,n$。

对方程组(2)进行消元处理，即可得到一个线性方程组(3)：

$$\begin{cases}B(1,1)x+B(1,2)y=L(1)\\B(2,1)x+B(2,2)y=L(2)\\\cdots\\B(n,1)x+B(n,2)y=L(n)\end{cases}\tag{3}$$

其中：

$$B(i,1)=\frac{(t_{i+2}-t_i)}{(t_{i+1}-t_i)}(x_i-x_{i+1})-(x_{i+1}-x_{i+2})$$

$$B(i,2)=\frac{(t_{i+2}-t_i)}{(t_{i+1}-t_i)}(y_i-y_{i+1})-(y_{i+1}-y_{i+2})$$

对方程组(3)建立误差方程：

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{X}}-\boldsymbol{L}\tag{4}$$

解误差方程(4)，可得到声源的位置坐标(x，y)。

当矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的秩等于 2 的时候，则广义逆 $pin(\boldsymbol{B}')$ 与矩阵 $\boldsymbol{B}'$ 相乘便可以求得声源位置坐标的唯一解。当矩阵 $\boldsymbol{B}'$ 的秩小于 2 时，为秩亏矩阵，无法计算出结果，产生这种情况的原因，可能是由于探测器的布站方式不当或者探测器的数量不足 3 个。

使用该算法的解算程序，计算机的执行时间主要取决于 $\boldsymbol{A}'$ 的广义逆 $pin(\boldsymbol{A}')$ 的计算速度，矩阵 $\boldsymbol{A}'$ 维数是 $2n$。随着探测器的数量增加，矩阵维数线性增长，因此该算法执行效率较高，特别是探测器数

量较多时，更加体现其优势[6]。但是该算法的解算精度受探测器的布站方式影响，因此当声源处于探测器阵列外时，误差较大。

1.4　算法二

采用上述解法，用全部探测器数据按最小二乘法解算，当个别探测器的观测值误差较大时，会使解算结果产生偏移。为了提高计算精度，降低观测值误差对定位结果的影响，我们对此算法进行了改进，得到算法二。

算法二本质是采用组合法解算出全部可能的解，从中剔除偏差较大的解，剩余部分取平均作为最终解。

具体步骤如下：

(1) 按每 5 个一组对探测器进行分组，得到全部不同的组合。n 个探测器，共有 C_n^5 个不同的组合。当探测器数量较多时，分组数会很多。例如，探测器为 12 个时，分组数为 792(C_{12}^5)；探测器为 16 个时，分组数 4368(C_{16}^5)。

(2) 用每一组探测器探测的特征点时刻按照算法一的公式解算声源的坐标值。

(3) 计算声源坐标的分布中心及方差，然后剔除距分布中心 1.5 倍方差以外的解。

(4) 对剩下的解计算其距分布中心的距离，剔除距离最远的解，再返回步骤(3)，这个过程重复进行，直至剩下 N 个解，需根据具体情况确定 N 的取值。

(5) 对剩下的 N 个解取平均，作为最终的声源位置。

使用该算法的解算程序，可以有效地剔除误差较大的数据，抗干扰性较强，解算精度较高，并且受探测器布点方式的影响较小，只要不在一条直线上即可。但是需要对每一组探测器数据进行解算，解算次数为 C_n^5，随着探测器数目的增加，组合数也在迅速增加，特别是探测器数量较大时，程序的执行效率大大降低。

2　仿真分析

如图 3 所示，实际应用中发现，当目标分布较为均匀、随机性较强时，采用“口”字型布站效果较好，因此本文模拟 12 个探测器组成“口”字型阵列，在其内部和外部各随机放置 8 个声源。

探测器与声源的位置关系仿真出一组数据，代表探测器捕获的目标特征点时刻，并且在这些数据中添加±5 ms 的偶然误差。仿真数据如表 1 所示，表中 Tar1…Tar16 为声源目标序号，由于数据量较大，表中只显示部分仿真数据。

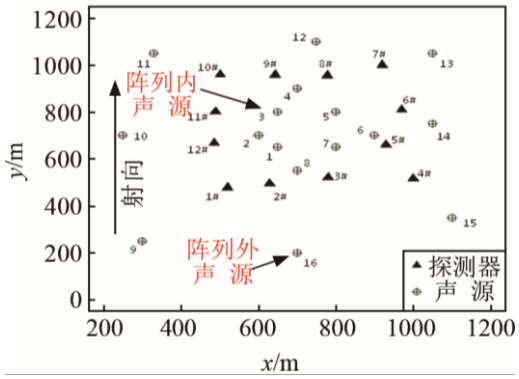


图 3　探测器及声源分布图

Fig.3　Distribution of detectors and sound source

表 1　目标特征点时刻的仿真数据(单位：s)

Table 1　Simulated target time data (unit: s)

探测器编号	Tar1	Tar2	Tar3	…	Tar15	Tar16
1	0.633	0.696	1.017	…	1.770	1.033
2	0.463	0.610	0.901	…	1.853	1.265
3	0.535	0.742	0.905	…	2.040	1.643
4	1.104	1.293	1.322	…	2.523	2.271
5	0.820	0.978	0.922	…	2.103	1.999
6	1.054	1.134	0.943	…	2.009	2.145
7	1.298	1.285	0.993	…	1.738	2.163
8	0.970	0.913	0.588	…	1.349	1.723
9	0.904	0.765	0.467	…	0.956	1.387
10	1.011	0.812	0.641	…	0.574	1.065
11	0.646	0.443	0.478	…	0.871	0.763
12	0.483	0.348	0.617	…	1.214	0.701

用两种算法分别对仿真数据进行计算，并将解算的结果进行比对。如图 4、图 5 所示，图 4 表示两种算法解算结果在 x 方向的误差折线图，图 5 表示两种算法解算结果在 y 方向的误差折线图。从显示图中可以分析出如下两点结论：

(1) 在两个方向上，不管采用哪种算法进行解算，声源位于探测器阵列内部时的解算精度明显高于在探测器阵列外部。因此在试验前，了解目标的散布是非常必要的，尽量使探测器布设在声源四周；根据具体的散布情况，设计出合理的布站方式是获得高精度定位结果的重要条件。

(2) 当目标出现在探测器阵列内部的时候，采用两种算法的解算精度无明显差别，但是，目标出现在探测器阵列外部的时候，采用算法二的结果明显要优于算法一。上述分析可知，当声源处于阵列外部时，算法一的观测值误差影响被放大，结果产

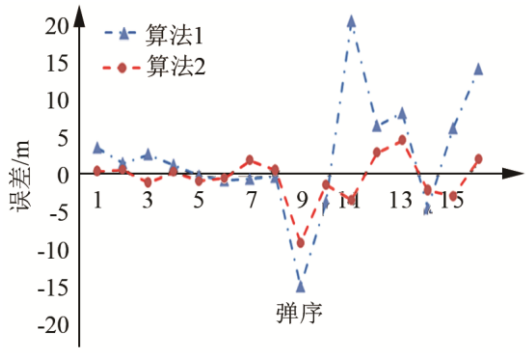


图 4 两种算法的解算结果误差折线图(x 方向)

Fig.4 The deviation line graph of the solutions of the two algorithms in the x direction

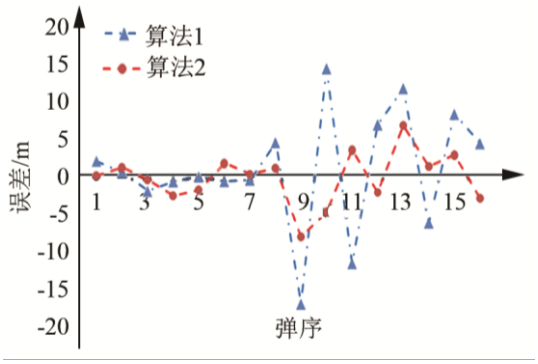


图 5 两种算法的解算结果误差折线图(y 方向)

Fig.5 The deviation line graph of the solutions of the two algorithms in the y direction

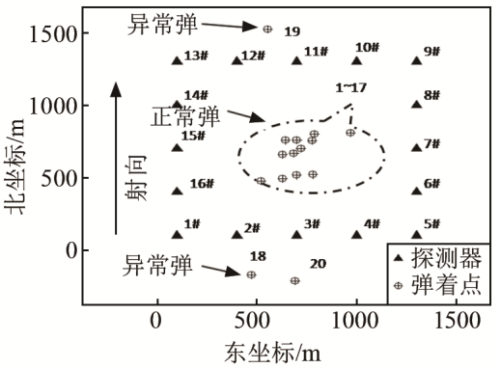


图 6 探测器及弹着点分布图

Fig.6 Distribution of detectors and point of impact

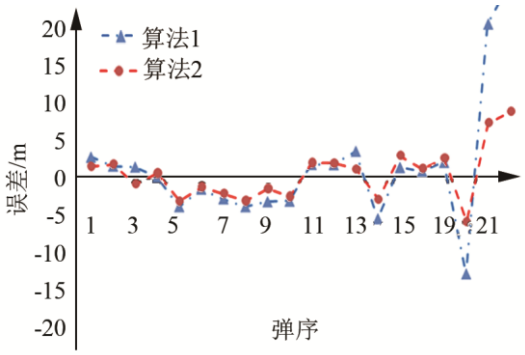


图 7 两种算法的解算结果显示图(东方向)

Fig.7 The deviation line graph of the solutions of the two algorithms in the east direction

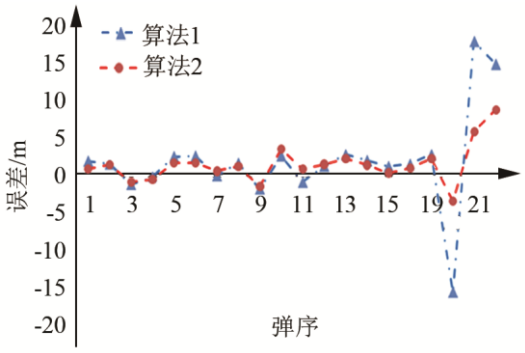


图 8 两种算法的解算结果显示图(北方向)

Fig.8 The deviation line graph of the solutions of the two algorithms in the north direction

生较大偏移；算法二可将误差较大的观测值剔除，降低有害信息的影响，具有较好的鲁棒性。

3 试验数据分析

通过对仿真数据的解算，总结出了一些有益的结论，但是，在实际应用中，很难达到理想状况。为了验证上文分析的正确性，使结论更有说服力，文章选取真实的试验数据对上述两种算法进行验证分析。

在某型炮弹实弹射击试验中，设置探测器个数为 16，以“口”字形布设，尽量做到阵列包围所有炮弹的弹着点，探测器间距大约 300 m，试验中有 3 发炮弹偏离理论落区(实际试验时，对偏离理论落区的弹丸进行定位是非常重要的，它涉及试验人员的安全)，其余 17 发炮弹的弹着点位于探测器阵列内，图 6 为试验场区示意图。分别采用两种算法对试验数据进行解算，结果如图 7、图 8 所示。图 7、8 中，横坐标代表弹着点序号，前 17 个弹着点位于探测器阵列内部，后 3 个点位于探测器阵列外部。

在解算前，对原始数据进行预处理，剔除粗差数据，使观测值只存在偶然误差。通过对两个方向的误差折线图进行分析，得出如下结论：

当弹着点位于探测器阵列内部时，采用两种算法的解算精度无明显差别，两个方向的均方差值明显小于 5 m，满足设备指标要求。当弹着点位于探测器阵列外部时，精度明显下降。受弹着点位置影响，算法一误差严重超限，而算法二的解算精度明显优于算法一，这一点与仿真数据得出的结论是一致的。

4 结 论

本文采用两种声源定位算法对仿真数据以及实测数据进行解算分析，得到如下几点结论：

(1) 采用算法一时，探测器数量不能低于 3 个，该算法的核心是最小二乘原理，因此数据冗余量越大抗干扰性越好，精度越高。算法二要求最低 6 个探测器，适当增加探测器个数，会增加数据量，提高可靠性。

(2) 算法一的解算精度与布站方式有很大关系，当声源位于探测器阵列外侧时，受观测值误差影响较大；算法二的解算精度与布站的几何图形也有一定的关系，当弹丸距理论落点分布较大时，除正方形外，其他布设方式精度可能都比较差。

(3) 算法一解算程序的执行时间受参与计算的观测值数量的影响，随着探测器的数量增加，矩阵维数线性增长，增长相对缓慢，因此该算法执行效率较高，而算法二需要对每一组探测器数据进行解算，解算次数为 C_n^5，随着探测器数目的增加，组合数也在迅速增加，特别是探测器数量较大时，程序的执行效率大大降低。

(4) 当目标出现在探测器阵列内部，并且探测器数目较多时，算法一与算法二解算的精度相差不大，为提高程序执行效率，建议选择算法一进行解算。当声源出现在探测器阵列外部时，算法一抗干扰性较差，精度明显低于算法二，因此应选用算法二，可以有效剔除误差较大的解，鲁棒性好，解算精度高。

参 考 文 献

[1] 马朝军, 狄长安, 孔德仁. 基于地震波的弹丸落点定位模型[J]. 四川兵工学报, 2012, **33**(07): 19-23.
MA Chaojun, DI Changan, KONG Deren. The projectile falling point localization model based on seismic wave[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, **33**(07): 19-23.

[2] 王新洲, 陶本藻, 邱卫宁, 等. 高等测量平差[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
WANG Xinzhou, TAO Benzao, QIU Weining, et al. Higher surveying adjustment[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006.

[3] 崔希璋, 於宗俦, 陶本藻. 广义测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 27-30.
CUI Xizhang, YU Zongchou, TAO Benzao. Generalized Surveying Adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 27-30.

[4] 黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992.
HUANG Weibin. The Principle and Application of Modern Adjustment[M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Press, 1992.

[5] 刘玉鹏. 爆炸炸点传感器探测系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 1-3.
LIU Yupeng. Research of explosive blast point sens-or detection system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004: 1-3.

[6] 叶建森. 基于声延时测量技术的弹丸落点定位系统的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2007: 7-10.
YE Jiansen. Design and implementation of projectile falling point localization system based on acoustic time del-ay measure technology[D]. Taiyuan: North U-niversity of China, 2007: 7-10.

[7] 陈东明, 常桂然, 朱志良. 基于声学法弹着点精确定位方法研究[J]. 兵工学报, 2006, **27**(03): 1-2.
CHEN Dongming, CHANG Guiran, ZHU Zhiliang. An acoustic method for the detection of precise orienta-tion of bomb falling points[J]. Acta Armamentarii, 2006, **27**(03): 1-2.

[8] 余腊生, 王鹏仁. 基于立体声信号的声源定位算法研究[J]. 计算工程与设计, 2007, **28**(23): 1-3.
YU Lasheng, WANG Pengren. Research of acoustic l-ocalization algorithm based on three-dimension aco-ustic signals[J]. Computer Engineering and Design, 2007, **28**(23): 1-3.