

一种改进的弹丸落点声学定位方法^{*}

于国栋[†] 王世赞 王春阳

(中国白城兵器试验中心 吉林 137001)

2017 年 11 月 29 日收到

2018 年 3 月 17 日定稿

摘要 研究了基于传感器阵列的声源定位技术,并在此基础上提出了一种改进的最小二乘声源定位方法。首先,根据风速、风向、温度对声速的影响,建立了观测值修正模型,再根据误差传播特性合理分配权阵,然后用最小二乘法进行定位解算;考虑观测值中可能含有粗差,将 IGG3 抗差模型加入到数据处理中,以提高系统的抗干扰能力;另外,通过观察残差向量,判断可能出现时序错误的观测值,再对时序不断调整,解决多声源时序混乱的问题。最后,通过对试验数据解算分析,证明本文方法的有效性和可行性。试验结果表明:改进的最小二乘声源定位方法可使定位误差达到 4 m 以下。本文所提方法不仅能有效降低粗差的影响,而且可准确处理多声源定位中观测值时序关系混乱的问题,可靠性较高。本文的研究内容紧密联系实际,可为声源定位设备的设计和应用提供参考依据。

PACS 数: 43.58, 43.60

Improved acoustic localization method for projectile dropping point

YU Guodong WANG Shizan WANG Chunyang

(Baicheng Ordnance Test Center of China Jilin 137001)

Received Nov. 29, 2017

Revised Mar. 17, 2018

Abstract On the base of the acoustic source localization technology based on sensor array, an improved Least Square localization method is proposed. First, According to the effect of wind velocity, directions, and temperature on sound velocity, the correction model of the observations is illustrated. then correct the weight matrix by the law of error propagation, after that, location calculation by least square method. Considering that the existence of the gross error is possible, IGG3 robust model is integrated into the process to improve the anti-interference ability of the system. Additionally, the wrong observations are judged by observing the residuals vector, then the time series chaos problem is solved by adjusting the series. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are certified by calculating and analysing the real experimental data. The results show the improved Least Square localization method achieves the location accuracy within 4 m. The method proposed can not only effectively reduce the influence of gross errors, but also solve the chaos in observational series perfectly, and the reliability of the system can be improved. The research work that is closely related to practice provides reference for the design and application of acoustic source localization equipment.

引言

基于传感器阵列的声源定位技术作为声源定位领域的重要研究方向,在军事、工业等领域有着大量

的应用。常用的声源定位方法有匹配场定位、波束形成定位、声程差几何定位^[1]。匹配场定位和波束形成定位计算量较大^[2-3],难以实时监测。基于声程差几何定位因具有良好的实时性和估计精度,在工程实践中被广泛应用^[4-7],该方法通过检测各传感器接收

^{*} 军队试验技术研究项目(12-sy14)资助

[†] 通讯作者: 于国栋, daya9527@126.com

到同一声源信号到达的时延差计算声源坐标，定位精度受阵列几何形状影响较大，因此，除了要求时延差观测值精度高之外，要求定位模型鲁棒性也要好。

近年来，国内外多位学者从传感器阵列的布设方式^[8-10]、时延估计^[11-12]、定位解算算法^[13-15]、环境因素对定位精度的影响^[16-18]以及多声源定位^[19-21]等方面进行了大量研究。这些研究具有较高的参考价值，能解决大多数声源定位问题，但是遇到一些复杂的情况，就需要采取特殊的处理方法才能得以解决。例如下面几种情况：(1) 部分处理方法需要传感器阵列严格按照要求布设，在实践中，受地形和具体任务限制，布设方式难以满足要求；(2) 声速受温度、风速、风向等多种条件影响，不是一个固定值，需要对其进行修正；(3) 当多个声源的信号以较短的时间间隔依次发生时，由于声波传播速度较慢、以及空间位置差异，会造成探测器接收信号的时序关系发生混乱^[19]，如某探测器可能在接收到第一个声源信号前，先接收到第二个声源信号，如果不加处理必然得到会出现错误的定位结果；(4) 大多数数据处理方法有效的前提条件是观测值中仅存在随机误差，但是实际数据采集过程中，由于授时跳秒、信号延迟、波形失真等原因不可避免会产生粗差^[22]，粗差的存在不但降低了声源定位精度，同时也降低了系统的可靠性。

针对上述实际存在的特殊情况，本文提出了一些对应的解决方法。通过研究风速、风向、温度对声速的影响，建立了时延差修正模型，根据误差传播特性合理分配权阵，提出了一种改进的最小二乘声源定位方法；同时考虑到观测值中可能存在粗差，将抗差模型加入到解算过程中，以提高系统的抗干扰性，使参数估计的结果达到最优或接近最优；另外，针对多个声源的信号以较短的时间间隔依次发生，造成探测器接收信号的时序关系发生混乱的问题，提出了两种多声源定位方法，原理为通过观察残差向量是否超限，判断可能出现时序错误的观测值，再对信号时序重新排列，解决时序混乱问题。最后，对靶场的试验数据进行解算分析，证明本文方法的可行性和有效性。

1 原理及数学模型

1.1 单声源定位方法

待估计参数为声源坐标 (x, y, z) ，需要布设 3 个以上探测器才能得到声源的位置，设探测器数量为 n 。如图 1 所示，在统一坐标系下，各探测器坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) ， (x_2, y_2, z_2) ， \dots ， (x_n, y_n, z_n) ， t_1, t_2, \dots, t_n

为各探测器接收到声源信号的时刻。以 t_1 为基准，其它时刻与 t_1 的时间差为 $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \dots, \Delta t_{1n}$ ，空气中声速为 v 。

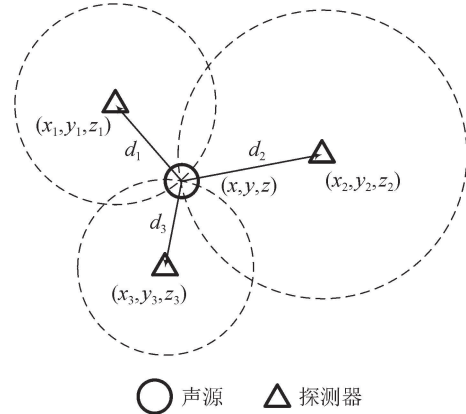


图 1 定位示意图

根据探测器与声源的几何关系，可构造如下误差函数：

$$f_i(x, y, z) = d_i - d_1 - v \times \Delta t_{1i}, \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}. \quad (2)$$

由式 (1) 可以看出，声源坐标 (x, y, z) 与时延差 Δt_{1i} 呈非线性关系，需要进行线性化处理，对式 (1) 在初值 (x_0, y_0, z_0) 处进行泰勒级数展开，省略二次以上高阶项，建立误差方程：

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\widehat{\mathbf{X}} - \mathbf{L}, \quad (3)$$

式中 $\widehat{\mathbf{X}}(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为声源坐标估值的改正数， $\mathbf{L} = [l_{12}, l_{13}, \dots, l_{1n}]^T$ 为观测值向量，其中：

$$l_{1i} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - v \times \Delta t_{1i}. \quad (4)$$

系数矩阵为：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x} & \frac{\partial f_i}{\partial y} & \frac{\partial f_i}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} = (x_0 - x_i) \times \frac{1}{d_i} - (x_0 - x_1) \times \frac{1}{d_1}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial y} = (y_0 - y_i) \times \frac{1}{d_i} - (y_0 - y_1) \times \frac{1}{d_1}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial z} = (z_0 - z_i) \times \frac{1}{d_i} - (z_0 - z_1) \times \frac{1}{d_1}, \quad (8)$$

d_i 由初值 (x_0, y_0, z_0) 代入式 (2) 得出。

根据最小二乘原理, 可列出法方程:

$$B^T P B \hat{X} = B^T P L. \quad (9)$$

当矩阵 B 为列满秩矩阵时, 解法方程可得唯一解:

$$\hat{X} = (\delta x, \delta y, \delta z) = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (10)$$

其中, P 为观测值权阵, 它能反映观测值精度的优劣, 当观测值精度相同, 且不考虑彼此相关性时, 取单位矩阵。

将式 (9) 解算结果与初值相加, 即可得到声源坐标为:

$$x = x_0 + \delta x, y = y_0 + \delta y, z = z_0 + \delta z. \quad (11)$$

如果 \hat{X} 值较大, 令 (x, y, z) 为初值, 重复上述计算过程, 直到 $\delta x, \delta y, \delta z$ 均小于 1×10^{-3} m 为止。

实践中, 当探测器精度不一致、且与声源距离相差较大时, 如果将矩阵 P 设定为单位矩阵, 可能会对结果产生一定的不利影响。

假设各探测器采集的信号相互独立, 声源到达探测器的时间误差为 ε_i , 设 ε_i 是零均值、方差为 σ_i^2 的随机误差, 根据文献 23, 信号信噪比与声源到探测器节点的距离的平方成反比^[23], 再依据文献 18 中的式 (8), 可得:

$$\sigma_i^2 = c_r \times d_i^2, \quad (12)$$

其中, $c_r = 1/(8\pi^2 b t_s f_c^2 \text{SNR}_{1\text{ m}})^{[18]}$, b 为带宽, t_s 为持续时间, f_c 为中心频率, $\text{SNR}_{1\text{ m}}$ 为离声源 1 m 处的信噪比。

时间差公式为:

$$\Delta t_{1i} = \hat{t}_i - \hat{t}_1 + \Delta \varepsilon_i. \quad (13)$$

根据误差传播特性, 可得:

$$\sigma_{i1}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_1^2. \quad (14)$$

权阵 P 为:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{\Delta}^{-1} = \sigma_0^2 (\Sigma_i + \Sigma_1)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{21}^2} & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & \cdots & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \\ \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{31}^2} & \cdots & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & \cdots & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{n1}^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\Delta \varepsilon_i$ 为时延差误差, σ_{i1}^2 为 $\Delta \varepsilon_i$ 的方差, Σ_i

为 ε_i 的方差矩阵, σ_0^2 为单位权中误差, 通常可设 $\sigma_0^2 = \sigma_{21}^2$ 。

声速受传播环境影响而呈现为非固定值, 在信号到各探测器的传播路径上也将会不同。1.2 小节的模型中, 声速被认为是固定值, 显然是不合理的, 因此, 需要在数据处理前对时延观测值进行修正。

温度与声速近似成线性关系, 公式为^[24]:

$$v \approx 331.6 + 0.6 \times t, \quad (16)$$

t 为环境温度, 单位为摄氏度。

设风速为 v_0 , 风向为 θ (与 x 轴正向的夹角), 时延观测值修正模型为:

$$\Delta \hat{t}_{1i} = (t_i - t_0) - (t_1 - t_0) = \frac{d_i}{v + v_0 \cos(\theta - \alpha_i)} - \frac{d_1}{v + v_0 \cos(\theta - \alpha_1)}, \quad (17)$$

t_0 为声源发出声波的起始时刻; α_i 为向量 $(x - x_i, y - y_i, z - z_i)$ 与 x 轴正向的夹角; $\Delta \hat{t}_{1i}$ 为时延差修正值。

将 $\Delta \hat{t}_{1i}$ 作为观测值代入 1.2 小节的模型中, 即可获得精确的声源坐标。

上文介绍的定位算法基于最小二乘原理, 不具有抗差能力, 但是由于多种原因, 粗差不可避免, 因此, 需要引入抗差模型。粗差的处理方法多数采用等价权函数对可疑数据进行降权, 达到抗差的目的。

等价权函数有很多种, 其中 IGG3 模型效果较好, 应用较为广泛, 具体模型为^[25]:

$$\bar{P}_i = \begin{cases} p_i, & |\tilde{v}_i| \leq k_0, \\ p_i (k_0/|\tilde{v}_i|)^2 d_i^2, & k_0 < |\tilde{v}_i| \leq k_1, \\ 0, & |\tilde{v}_i| > k_1, \end{cases} \quad d_i = \frac{k_1 - |\tilde{v}_i|}{k_1 - k_0}, \quad (18)$$

其中, k_0, k_1 为常数, 可根据残差 \tilde{v}_i 决定取值范围, 通常为: $k_0 = 1.5 \sim 2.0, k_1 = 3.0 \sim 5.0$ 。

为了不受先验单位权中误差取值的影响, 保证良好的抗差性, 本文采用标准化残差构造权因子函数。计算公式为^[26]:

$$\tilde{v}_i = \frac{v_i}{\delta_0 \times \sqrt{Q_i}}, \quad (19)$$

其中, Q_i 为第 i 个残差的协因数, v_i 为残差向量中第 i 个元素, δ_0 为单位权中误差, 可通过中位数法获得:

$$\delta_0 = \frac{\text{Median}(|v_i|)}{0.6745}, \quad (20)$$

其中, $\text{Median}(|v_i|)$ 为取残差向量中位数。

1.2 多声源定位方法

当有多个声源以较短的时间间隔出现时, 会出现时序混乱的情况。如图 2 所示, 该图显示了产生时

序混乱的原因，5# 探测器先采集到声源 4 的信号，因此，会将声源 4 的信号当成声源 3 的信号进行处理。为了能正确匹配各声源的时延信息，需要对接收信号时序重新排序。

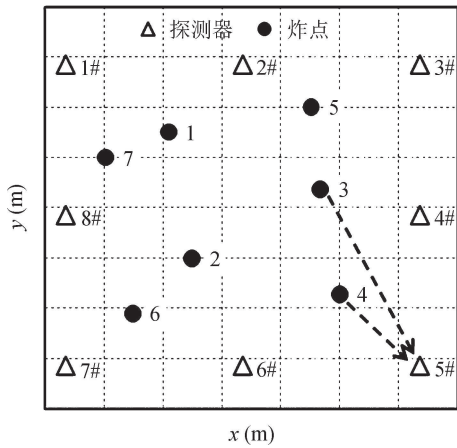


图 2 接收信号时序混乱示意图

由于时序混乱，数据匹配不正确，可能产生错误的结果，甚至出现发散的情况。处理这类问题的关键是确定各探测器数据是否来自同一个声源，只有把同一声源的数据组合起来，才能得到正确的结果。国内外，多位学者针对多声源目标定位问题提出了多种处理方法，其核心思想是列出所有组合，利用数据关联算法，得出比较满意的次优解。不同点在于关联算法的选择，如极大似然法、模拟退火法、网格定位法等^[19-21]。

本文提出了两种不需要列出所有组合即可推算出多声源位置的方法。

第 1 种方法的基本原理为：将时延差观测值按从小到大顺序进行排列，对各目标进行定位解算，由于受时序混乱的影响，观测值中存在错误的的数据，因此，为降低或消除其影响，引入抗差模型，以提高抗干扰性，将得到的概略声源坐标代入式 (1)，反算各探测器的时延差，将其与观测值对比，即可判断出时序错误的探测器，将出现问题的探测器时序进行调整，直至所有声源的反算时延差与观测值几乎相等为止。具体的过程如图 3 所示。

与文献 19 相比，上述方法原理简单，易于实现，可避免大量循环计算，效率较高。但仅适合时序错误较少的情况，当较多探测器出现时序错误时，无法得出各声源目标的概略坐标和反算时延差，进而不能判断出时序错误的探测器。

为处理上述问题，本文提出了第 2 种方法。其基本原理为：选择若干个布站几何较好的探测器 (探测器组成的阵列尽量将所有声源包含其中)，探测器数

量必须满足有多余观测，并且组合数不易过多，应用中通常取 5。得出这些探测器正确的时序，再逐次将其它探测器数据加入到解算模型中，依次调整它们的时序，直到所有的探测器调整完毕为止。

具体过程如下：

(1) 选择布站几何较好的 5 个探测器进行排列组合，设声源数为 n ，则组合数为 n^5 。

(2) 对所有组合进行定位解算，找出方差较小的若干组合。

(3) 同一个声源的信号不可能重复使用一个探测器的两个时延值，以此为判断依据，得到真实解的 n 个组合。

(4) 将第 6 个探测器数据加入到上面的数据中，进行解算，如果出现残差较大的情况，必然是后加入的数据出现错误，需进行时序调整，直到满足要求为止。

(5) 重复过程 (4)，将剩余的探测器时序调整完毕。

这种方法由于需要解算大量的时序组合，随着声源数量的增加，组合数随之增长，解算速度逐渐变慢。

针对上述两种方法各自的优势与劣势，在实践中，如果声源数量较少时，直接使用第 2 种方法，如果声源数量较多，可先使用第一种方法进行处理，如果无法准确找到时序错误的探测器，则说明第 1 种方法失效，只能采用第 2 种方法进行处理。

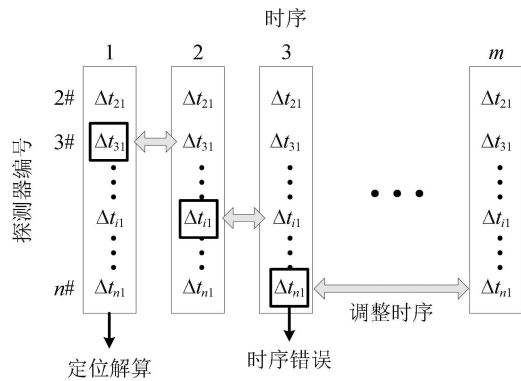


图 3 多声源定位数据处理原理图

2 试验数据处理与分析

2.1 试验与数据

选取靶场某次射击试验的数据对本文所提方法进行验证。试验使用的设备为靶场自主研发的一套落点坐标测试系统，组成结构如图 4 所示^[27]，其中，前端探测器采用声波传感器，其灵敏度为 50 mV/Pa。

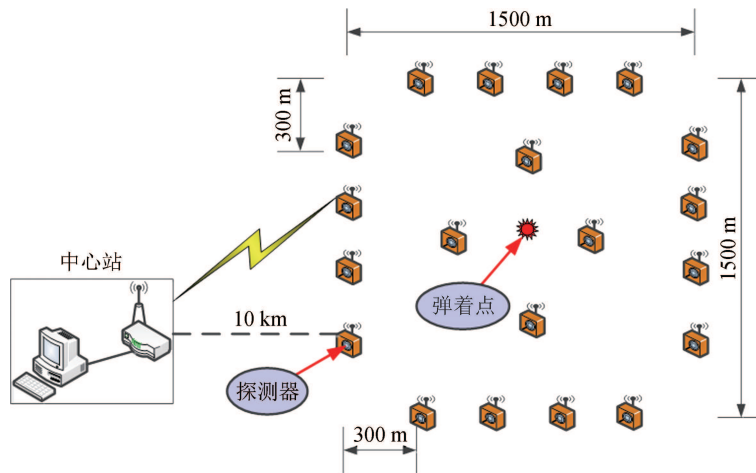


图 4 落点坐标测试系统示意图

试验当天气温为零下 10°C, 风速 6~8 m/s, 风向偏北, 在地面架设气象设备实时采集气象参数。图 5 为试验场景图, 场区内地势较平坦, 选取 16 个探测器以“口”字型布设, 间隔大约 300 m, 尽量使阵列包围所有弹着点。探测器位置信息用 RTK (Real - Time Kinematic) 技术获取, 精度为厘米级, 由其导致的定

位误差可忽略不计。

场区地势较平坦, 弹着点与探测器之间的高程差很小, 即 $(z_0 - z_i)/d_i \approx 0$, 因此, 系数矩阵 B 的第 3 列数值与其它两列相差较大, 矩阵 $(B^T P B)^{-1}$ 可能出现病态。随机选取 46 发弹的试验数据, 求矩阵 $(B^T P B)^{-1}$ 2 范数下的条件数, 结果如图 6 所示, 所有的条件数均大于 1000 (条件数大于 1000 可认为矩阵病态)。由于弹着点的平面坐标精度更为重要, 为防止其被病态矩阵影响, 本文对 1.2 小节的模型进行调整, 将求三维坐标改为求平面坐标。具体方法是删除与高程有关的项, 即删除系数阵第 3 列, 使其变为 $n - 1$ 行、2 列矩阵; 删除式 (4) 中与高程有关项, 具体形式如式 (21) 所示。也可以通过对病态矩阵采用有偏估计的方式进行处理, 但是会降低平面坐标的精度, 同时计算较为繁琐, 因此, 不予考虑。

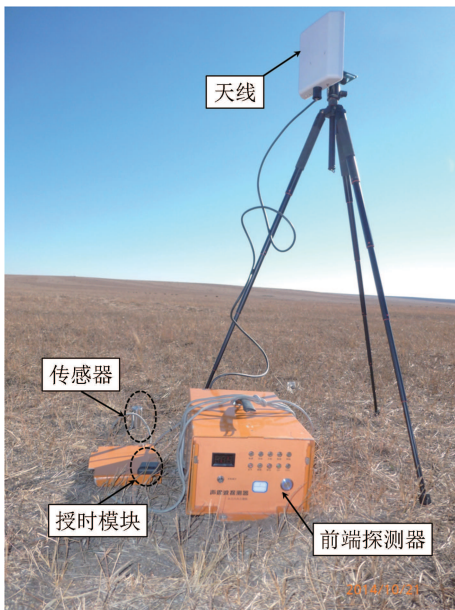


图 5 试验场景图

$$l_{1i} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} - v \times \Delta t_{1i}, \quad (21)$$

2.2 改进的最小二乘迭代方法的精度分析

采用 3 种方案分别对 131 发弹的试验数据进行解算, 并将结果与实地测量值比对, 两者的距离差作为定位误差, 结果如图 7 和表 1 所示。

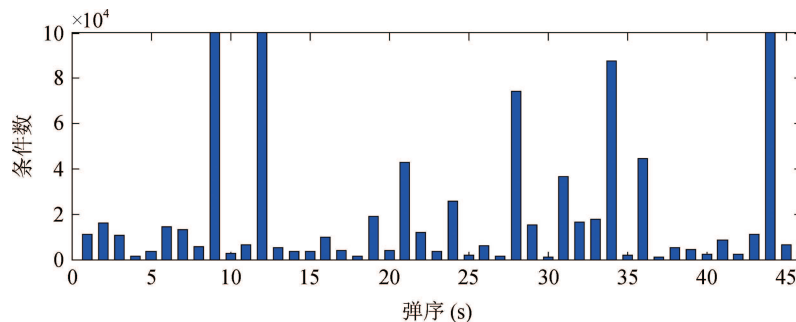


图 6 式 (4) 求逆矩阵 2 范数下的条件数

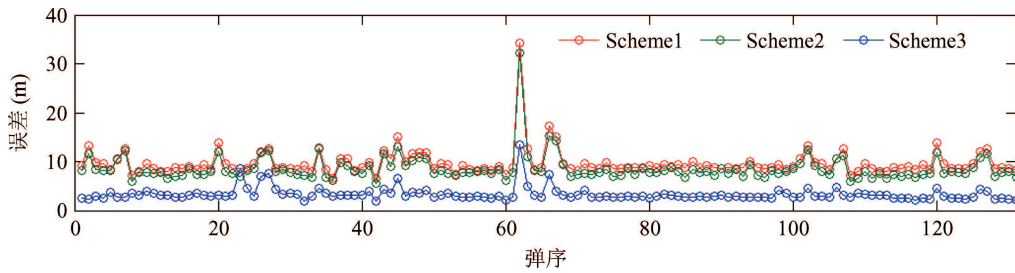


图 7 3 个方案的处理结果误差对比

表 1 3 种方案处理结果 (单位: m)

	方案 1	方案 2	方案 3
均方误差	10.5	9.1	3.6

3 种方案分别为:

(1) 不修正观测值, 权阵为单位矩阵, 用最小二乘迭代方法进行解算。

(2) 采用 chan 算法^[4]进行解算。

(3) 根据场区气象参数, 对观测值进行修正, 合理调整权阵, 然后用最小二乘迭代方法进行解算。

从图 7 可以看出, 前两种方案的解算精度相差不多, 个别点定位精度较差, 尤其第 62 发弹, 误差达到 30 m 以上, 出现这种情况的主要原因是存在粗差或者弹着点位置与探测器阵列的几何关系不理想, 除这些点外, 大多数弹着点定位精度均在 10 m 左右; 相比于前两种方案, 方案 3 的定位精度更高, 大多数弹着点定位精度均在 4 m 以下。由表 1 可知, 方案 3 的均方误差相比于其它两个方案, 分别提高了 5.5 m, 6.9 m。可见, 在数据预处理阶段, 根据气象参数对观测值进行修正, 以及对权阵进行调整, 对定位精度的提高是有益的。

2.3 稳健估计声源定位方法的精度分析

最小二乘迭代法不具有抑制粗差的能力, 必须向其中加入抗差模型才能降低或消除粗差的影响, 进而提高系统的可靠性。为体现这一点, 本文采用稳健估计法对上节中误差较大的 7 个数据重新进行解算, 参数值取值为: $k_0 = 1.5$, $k_1 = 3$, 结果如表 2 所示。

表 2 两种模型处理所得的误差对比 (单位: m)

弹号	无抗差模型	含抗差模型
20	13.8	3.2
34	12.7	2.4
43	12.2	3.1
62	34.2	8.8
66	17.2	4.2
102	13.3	1.8
107	12.6	3.2

从表 2 可以看出, 基于不同模型的定位结果差异显著, 当观测值包含粗差时, 无抗差模型的处理结果出现较大偏差, 最大可达 34 m, 而加入抗差模型后, 精度明显得到改善, 误差降低到 10 m 以下。可见, 稳健估计声源定位方法可以有效降低粗差的影响, 可得到最优或接近最优解。

2.4 多声源定位性能

选取有代表性的 2 组多发炮弹连续射击试验数据对本文所提的多声源定位方法进行验证, 其中一组只有少量数据出现时序混乱; 另外一组有较多数据出现时序混乱。

第 1 组为 4 连发射击试验数据, 它的处理结果如图 8 和图 9 所示。

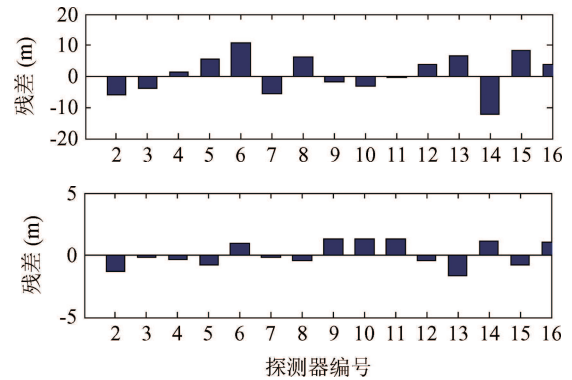


图 8 声源 1 的接收信号时序调整过程中的残差变化

将每个探测器的原始数据按从小到大的顺序排列, 对第一发弹的数据进行定位解算, 将结果代入式 (22):

$$V_i(x, y, z) = d_i - d_1 - v \times \Delta t_{1i}, \quad (22)$$

其中, $V_i(x, y, z)$ 为残差向量, 将坐标估计值 (x, y, z) 代入式 (2), 计算得到 d_i 。

得到的残差如图 8 中的上图所示, 图中可以看出残差向量能清楚的反映异常信息, 6 号、14 号探测器残差相对较大, 可能存在时序混乱, 调整时序, 再次计算, 得到残差向量如图 8 中的下图所示, 残差均小于 3 m, 符合要求, 可认为声源 1 的信号接收时序调整结束。

对第 2 发弹的数据重复上述过程，结果如图 9 所示。可以看出，首先，发现了 3 号、4 号、11 号探测器残差较大，对其时序进行调整，再次计算，结果发现 10 号探测器也出现错误，再次调整时序，结果如图 9 中的第 3 幅图所示，残差均小于 3 m，声源 2 的信号接收时序调整完毕。

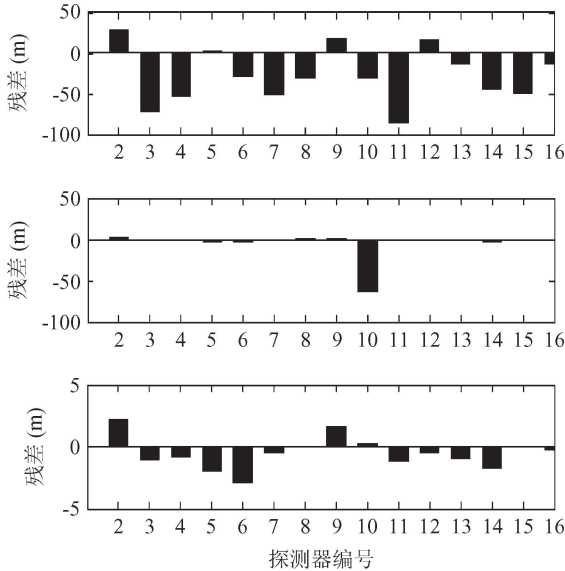


图 9 声源 2 的接收信号时序调整过程中的残差变化

采用同样的办法处理第 3、4 发弹的数据，过程不再详细叙述。

采用第 2 种方法对第 2 组数据进行处理，第 2 组也为 4 连发射击试验数据。首先，选取布站几何较好的 5 个探测器，将它们进行排列组合，组合数为 $4^5 = 1024$ 。

对每个组合进行计算，计算结果如图 10 所示，剔除明显错误的解，将剩余的解以方差最小为原则

进行排序。然后，以同一个声源的信号不可能重复使用一个探测器的两个时延值为依据，找出 4 个真解。

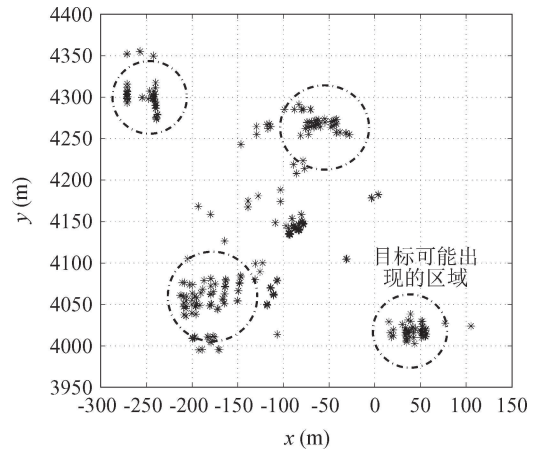


图 10 所有排列组合的计算结果

加入第 6 个探测器数据进行计算，结果如图 11 所示。可以看出残差向量中第 6 个元素明显偏大，说明异常信息的根源在 6 号探测器，只需对其进行调整即可。

使用上述步骤将后续的探测器数据依次进行调整。通过上述处理可以发现，这种方法不但可以解决时序错误较多的情况，而且只需要计算 5 个探测器的排列组合，处理速度较快，容易编程实现。

试验数据的处理结果表明：

(1) 通过对时延观测值进行修正和对权阵的调整，弹着点的定位精度得到显著提高，基本维持在 4 m 以下。

(2) 基于 IGG3 模型的稳健估计方法可降低或消除粗差的影响，使系统的鲁棒性更强。

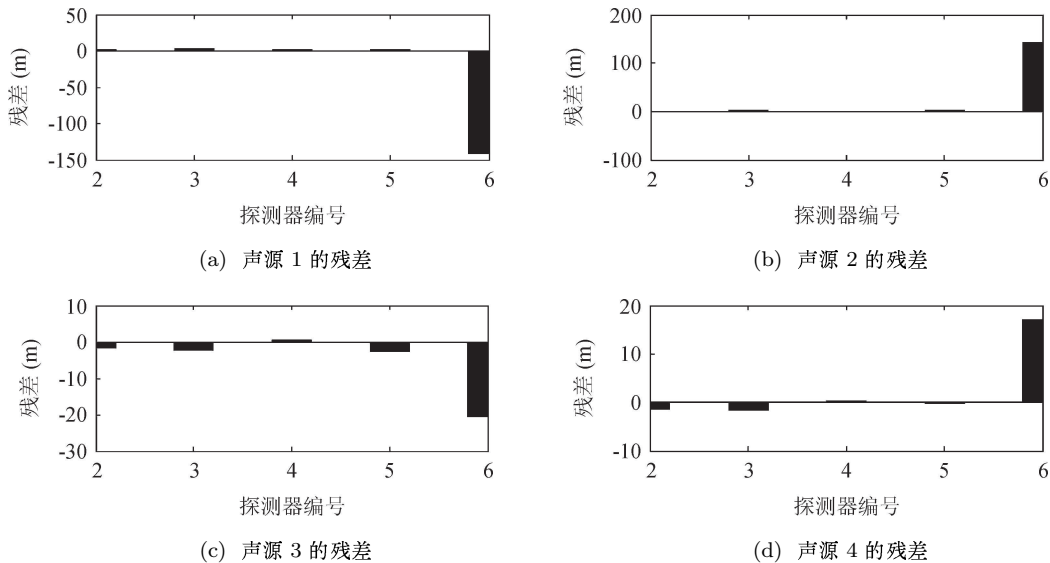


图 11 加入探测器 6 的数据后解算的残差

(3) 两种多声源处理方法, 不需要计算所有时序组合, 提高了计算效率, 并且方法简单, 易于实现。

(4) 在地势较平坦的地方进行试验时, 法方程系数阵病态, 当对高程精度要求低、而对平面精度要求较高时, 可删除高程有关项, 将三维坐标估计改为二维坐标估计。

3 结论

本文提出了一种改进的最小二乘声源定位方法, 其中包括单声源定位法和多声源定位法两部分。单声源定位法通过对时延观测值进行修正和对权阵的调整, 提高了定位精度。加入 IGG3 抗差模型, 可以降低或消除粗差的影响, 提高系统的抗干扰性; 多声源定位, 通过观察残差向量, 判断可能出现时序错误的观测值, 对时序不断调整, 以解决多声源时序混乱的问题。结果表明, 本文的方法可以有效提高声源定位解算精度, 具有较强的抗差能力, 可准确处理多声源定位中观测值时序关系混乱的问题。

在研究过程中, 我们还发现了一些还难以解决的问题, 需要作下一步研究。如下面几种情况: (1) 多声源信号出现粘连的情况, 需要研究出有效的方法将多个信号准确分离。(2) 当探测器与声源距离较远, 传播时间较长时, 风向和风速可能发生变化, 以固定参数的模型对时延观测值进行修正会对结果产生一定的偏差。(3) 声源目标出现在探测器阵列外或声源目标与探测器阵列高度差较小(如几乎在同一个平面)时, 定位模型可能呈现病态性, 需要进一步研究出高精度的处理算法。

参 考 文 献

- 1 杨亦春, 滕鹏晓, 李晓东. 小孔径方阵对大气中运动声源的定位研究. 声学学报, 2004; **29**(4): 347—349
- 2 易锋, 孙超. 总体最小二乘算法模波束形成方法研究. 声学学报, 2013; **38**(1): 35—37
- 3 李倩倩, 李整林, 张仁和. 不确定海洋环境下的贝叶斯声源定位法. 声学学报, 2014; **39**(5): 550—556
- 4 Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Trans. Signal Process.*, 1994; **42**(8): 1905—1915
- 5 韩云峰, 郑翠娥, 孙大军. 长基线声学定位系统跟踪解算优化方法. 声学学报, 2017; **42**(1): 14—20
- 6 陈韶华, 赵冬艳, 陈川. 海洋声学环境下水中声源的时延估计法定位精度分析. 声学学报, 2014; **39**(5): 535—543
- 7 滕鹏晓, 章林柯, 陈日林. 基于双传声器对的多声源二维定位跟踪算法. 声学学报, 2010; **35**(2): 230—234
- 8 Yan Q, Chen J. A practical approach for acoustic sensor network design based on performance analysis of TDOA localization method. *IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, IEEE, Chongqing, China, 2015: 150—154
- 9 林晓东, 吴松林, 张川. 六元探测基阵被动声定位算法及其性能研究. 声学技术, 2008; **27**(2): 192—194
- 10 崔林林, 宋萍, 石庚辰. 一种任意布设多元阵列的声定位方法研究. 压电与声光, 2017; **39**(2): 236—239
- 11 11 KNAPP C H, CARER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 1976; **24**(4): 321—327
- 12 FUCHS J J. Multipath time-delay detection and estimation. *IEEE Trans. Signal Process.*, 1999; **47**(1): 237—243
- 13 刘利军, 韩焱. 基于最小二乘法的牛顿迭代信源定位算法. 弹箭与制导学报, 2006; **26**(3): 325—328
- 14 E Mumolo, M Nolich, G Vercelli. Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics. *Robot. Auton. Syst.*, 2003; **42**(2): 69—88
- 15 吴晓平, 顾治华, 舒红波. 一种线性最小二乘法的声源目标精确定位方法. 声学学报, 2016; **41**(1): 87—93
- 16 P Annibale, R Rabenstein. Accuracy of Time-difference-of-arrival based source localization algorithms under temperature variations. *International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, IEEE, 2010: 1—4
- 17 颜华, 王善辉, 刘丽钧. 一种考虑声线弯曲的温度场重建算法. 声学学报, 2014; **39**(6): 705—713
- 18 闫青丽, 陈建峰. 风场环境中声速修正的分布式声源定位算法. 声学学报, 2017; **42**(4): 422—424
- 19 于平, 吴波. 多冲击声源定位算法. 声学技术, 2012, **31**(6): 621—622
- 20 Smith J O, Abel J S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 1987; **35**(12): 1661—1669
- 21 Vincent E, Araki S, Bofill P. The 2008 signal separation evaluation campaign: A community-based approach to large-scale evaluation. *International Conference on Independent Component Analysis and Signal Separation*, Springer-Verlag, 2009: 734—741
- 22 于国栋, 宋永志, 王世赞. 稳健估计下的声源定位最小二乘算法. 应用声学, 2017; **36**(1): 26—31
- 23 Saric Z M, Kukolij D D, Teslic N D. Acoustic source localization in wireless sensor network. *Circ. Syst. Signal Process.*, 2010; **29**(5): 837—856
- 24 刘玉鹏. 爆炸点传感器探测系统的研究. 南京: 南京理工大学, 2004
- 25 王潜心, 徐天河, 许国昌. 粗差检测与抗差估计相结合的方法在动态相对定位中的应用. 武汉大学学报·信息科学版, 2011; **36**(4): 476—480
- 26 王彬, 李建成, 高井祥. 抗差加权整体最小二乘模型的牛顿-高斯算法. 测绘学报, 2015; **44**(6): 602—605
- 27 于国栋, 宋永志, 王春阳. 两种不同的声源定位算法研究. 声学技术, 2016; **35**(5): 467—469