

## 无需预先测速的靶场弹丸落点定位算法实现

李鹏宇<sup>\*①②</sup> 车录锋<sup>①</sup> 郑春雷<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院上海微系统与信息技术研究所微系统技术国家级重点实验室 上海 200050)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>③</sup>(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

**摘要:** 该文针对现有靶场弹丸落点定位系统需要提前测量波速, 实际应用复杂, 定位误差大等问题, 提出一种无需预先测速的弹丸落点定位算法, 此算法采用米字型传感器阵列, 米字型阵列又可以分解成 2 组五元十字阵, 通过来波方向(DOA)算法预先估计波速, 然后把波束估计值代入到达时间差算法(TDOA)方程中计算初始位置, 再把初始位置和估计波速作为参数代入到泰勒级数展开算法中, 收敛定位。由于不需要预先人工测量波速, 减少了波速测量误差, 波速和定位位置都是在迭代算法中逐步收敛求精的, 所以该算法提高了弹丸落点定位精度, 减少了实际应用的复杂性。仿真算法也验证了此方法的可行性, 在距离定位阵列 1000 m 范围内迭代算法都是收敛的。

**关键词:** 弹丸落点定位; 到达时间差算法; 泰勒级数

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0322-06

DOI: 10.11999/JEIT160316

## Landing Point Location Algorithm Without Velocity Measurement in Target Range

LI Pengyu<sup>\*①②</sup> CHE Lufeng<sup>①</sup> ZHENG Chunlei<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Science and Technology on Microsystem Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>③</sup>(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** To overcome the large errors and complexity of measuring the wave velocity of landing point location algorithm in target range, a method based on poisoning algorithm without velocity measurement is proposed. Nine accelerate sensors constitute poizidriv shaped array, which also consists of 2 sets of five-element cross array. DOA algorithm is used to pre-estimate the wave velocity, then the wave velocity as the initial parameter is set into the equation to calculate the initial position. Lastly, as the parameters the initial position and the velocity are set into the Taylor iterative algorithm to get the final location result. Because wave velocity need not to be measurement, measurement error can be reduced, wave velocity and position value can be calculated by iteration algorithm, so this algorithm makes the landing point location more simple, more accurate. The simulation verifies that this method is measurable, and the iterative algorithm is convergent in the range of 1000 meters.

**Key words:** Landing point location; Time Difference Of Arrival (TDOA) algorithm; Taylor series

### 1 引言

弹丸落点定位是武器性能测试的重要步骤, 也是打靶演习中验证武器打击精度的重要环节, 当前靶场试验主要采用人工大面积搜索、被动声学、以及光电经纬仪、地应力波测量等手段, 其中人工搜索和光电经纬仪的定位精度差, 效率低, 已经不能满足现代化演习试验的需要; 被动声学法虽然在精确定位领域取得比较大的进展, 但是受环境和天气

的影响较大, 在野外恶劣环境下的定位会产生很大延迟; 地应力波测量<sup>[1,2]</sup>同声学和光学传感器定位手段相比, 具有系统使用简单可靠, 受环境和天气影响较小等优点, 地应力波测量法<sup>[1,2]</sup>主要采用加速度传感器感应地应力波, 通过 TDOA 传统算法计算定位, 但是在做定位计算前必须提前测量地波波速, 由于靶场地理环境复杂, 不同爆炸点到达传感器的地波波速并不相同, 采用固定波速测量定位算法<sup>[3,4]</sup>对于不同炸点的定位误差很大, 这也是导致地应力波测量方法不能广泛在大型靶场应用的主要原因之一。

针对上述问题, 本文提出了一种无需预先测速的弹丸定位地应力波测量算法, 通过采用米字型阵列结合 DOA 算法<sup>[5,6]</sup>, 对初始位置和波速进行了合理估计, 并把每次爆炸的地波波速作为 TDOA 方程组中的变量, 采用泰勒级数展开算法<sup>[7,8]</sup>快速收敛, 从而得到很高的地波波速和爆炸点定位精度, 解决了由于固定波速导致的定位偏差大的问题。

## 2 定位原理和算法

弹丸落点定位探测系统由爆炸源, 加速度传感器阵列, 信号处理设备组成。弹丸爆炸时, 沿地面会激发纵波(P波), 横波(S波)和瑞利波(R波)<sup>[9,10]</sup>, 由于本系统为远距监测<sup>[11]</sup>, P波和S波能量较小, 在未到达传感器位置时已经衰减到和噪声相当, 而R波能量很高, 可以到达传感器的位置, 所以加速度传感器阵列主要监测R波到时。由 $N$ 个加速度传感器组成检测阵列, 如图1所示, 9个加速度传感器同步接收R波到时, 再把波到时间数据通过无线通信方式传输给信号处理设备, 信号处理设备根据TDOA(到达时间差)<sup>[12,13]</sup>算法就可以计算出弹丸落点的位置。

### 2.1 定位模型

一般弹丸定位阵型包括五元十字阵<sup>[14]</sup>、菱形阵<sup>[15]</sup>、L型阵、直线阵等, 各种阵型都有优缺点, 其中五元十字阵被认为是定位效果最好的阵型, 但是五元十字阵中如果有一个传感器故障, 或者到时数据有很大偏差, 阵型就不完整, 导致不能达到良好的定位效果, 所以本设计采用了图1所示的米字型阵列, 由9个传感器组成检测阵列, 1为圆形中心, 2~9为相隔 $45^\circ$ 的传感器, 原型阵列里面优选1, 2, 4, 6, 8或者1, 3, 5, 7, 9传感器组成2组五元十字阵, 米字型阵列的优势是根据实际采集的数据情况能够灵活地变换阵型, 可以利用2个五元十字阵的波到时刻数据情况求取初始位置和波速, 然后进行迭代计算, 9个传感器可以任意两两组成TDOA

方程<sup>[16,17]</sup>, 多个定位方程组成方程组可以提高泰勒级数展开迭代算法的收敛速度。

图1中, 信号处理设备在实验前发送定位信标给所有传感器, 当传感器接收到定位信标后, 即调整各自的RTC时钟完成时间同步, 爆炸点的R波陆续达到米字型阵列中的每个传感器, 传感器分别记录到达波峰时刻 $t_1 \sim t_9$ 。各传感器把波到时刻数据通过无线通信的方式发送给信号处理设备, 信号处理设备收集到所有传感器的波到时刻数据, 组成TDOA方程组如式(1):

式(1)中 $(x, y)$ 为待定位置,  $r$ 为米字型阵列半径,  $V$ 为R波波速,  $\Delta t_{1i}$ 为中心传感器节点1与周边2~9传感器节点的波到时刻差值。

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x-r)^2 + y^2} &= V\Delta t_{12} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + (y-r)^2} &= V\Delta t_{14} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x+r)^2 + y^2} &= V\Delta t_{16} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{x^2 + (y+r)^2} &= V\Delta t_{18} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{\left(x - r \cos \frac{\pi}{4}\right)^2 + \left(y - r \sin \frac{\pi}{4}\right)^2} &= V\Delta t_{13} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{\left(x - r \cos \frac{3\pi}{4}\right)^2 + \left(y - r \sin \frac{3\pi}{4}\right)^2} &= V\Delta t_{15} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{\left(x - r \cos \frac{5\pi}{4}\right)^2 + \left(y - r \sin \frac{5\pi}{4}\right)^2} &= V\Delta t_{17} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{\left(x - r \cos \frac{7\pi}{4}\right)^2 + \left(y - r \sin \frac{7\pi}{4}\right)^2} &= V\Delta t_{19} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

此方程组为超定非线性方程组, 其中待定位置 $(x, y)$ 和波速 $V$ 为未知数, 必须通过迭代算法逼近最终位置。

### 2.2 定位算法

利用阵位中2~9传感器节点和中心传感器节点的波到时刻差, 通过DOA(到达角度)算法<sup>[18]</sup>和五元十字阵求解方程, 得到初始位置和波速估计。

(1)初步估计震动的方位角, 找到最先接收到震动波的传感器 $i$ , 其到达时刻为 $t_i$ 。

(2)米字型阵列的节点角度数组为:  $A=(0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315)$ ;

(3)到达时刻最小值的节点就是最先接收到震动波的传感器。

$$\theta = A[\min(t_2 \cdots t_9)] \quad (2)$$

(4)已知中心传感器1的到达时间 $t_1$ 和传感器 $i$ 的到达时间 $t_i$ , 根据直线公式估计速度 $v'$

$$v' = r/(t_1 - t_i) \quad (3)$$

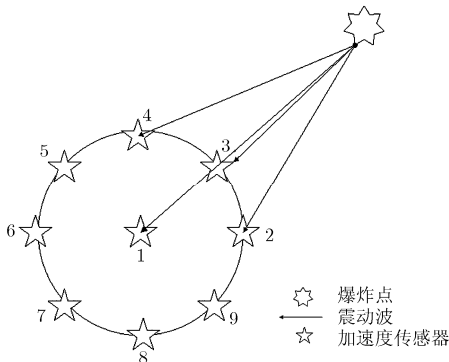


图1 米字型检测阵列示意图

这里的  $v'$  是波速估计值, 与实际波速  $v$  的有偏差  $\sigma_v = \text{abs}(v - v')$ , 必须通过后续的迭代算法逐步求精。

(5) 求出估计速度  $v'$  后, 选择一个五元十字阵的求根公式求出初始位置  $(x', y', v')$ , 本文以 1, 2, 4, 6, 8 传感器组成的五元十字阵为例, 求解方程为

$$\left. \begin{aligned} R &= (4r^2 - (v't_{21})^2 - (v't_{41})^2 - (v't_{61})^2 \\ &\quad - (v't_{81})^2) / (2v'(t_{21} + t_{41} + t_{61} + t_{81})) \\ x' &= (2Rv'(t_{61} - t_{21}) + (v't_{61})^2 - (v't_{21})^2) / 4r \\ y' &= (2Rv'(t_{81} - t_{41}) + (v't_{81})^2 - (v't_{41})^2) / 4r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用式(4)求出初始位置为  $(x', y', v')$ , 其中  $t_{i1}$  为第  $i$  个传感器和第 1 个传感器之间的波到时刻差,  $r$  为米字型阵列的半径,  $R$  为待定位置到中心传感器的距离。由于初始位置参数中的波速估计误差比较大, 导致最终估计位置误差也很大, 所以解算精度不高, 必须采用泰勒级数展开迭代算法来提高精度。

式(1)的泰勒级数展开公式为

$$f(x_1 + \delta x, y_1 + \delta y) = f(x_1 + y_1) + \delta x f(x_1, y_1) x + \delta y f(x_1, y_1) y + T \quad (5)$$

忽略 2 阶以上的分量后, 整理为

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}\Delta + \varepsilon \quad (6)$$

其中,  $\Delta = [\Delta x, \Delta y]$  为相邻 2 步迭代差值。  $\Delta x = x_k - x_{k-1}$ ,  $\Delta y = y_k - y_{k-1}$ ,  $(x_k, y_k)$  为第  $K$  次迭代的结果,  $(x_{k-1}, y_{k-1})$  为第  $K-1$  次迭代结果。

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} R_{21} - (R_2 - R_1) \\ R_{31} - (R_3 - R_1) \\ \vdots \\ R_{n1} - (R_n - R_1) \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, 待定位置到中心传感器的距离:  $R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ; 待定位置到传感  $i$  的距离:  $R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ ; 待定位置到中心传感器与传感器  $i$  的距离差:  $R_{i1} = v(t_i - t_1)$ ;  $(x, y, v)$  为迭代变量, 式(4)的结果  $(x', y', v')$  作为初始值代入。

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} -x/R_1 - (X_2 - x)/R_2, -y/R_1 - (Y_2 - y)/R_2 \\ -x/R_1 - (X_3 - x)/R_3, -y/R_1 - (Y_3 - y)/R_3 \\ \vdots \\ -x/R_n - (X_n - x)/R_n, -y/R_1 - (Y_n - y)/R_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中,  $(X_n, Y_n)$  为传感器的位置坐标,  $(x, y)$  为迭代变量。

算式(6)采用加权最小二乘法(WLS)算法, 可以得到  $\Delta$  的最小二乘估计为

$$\Delta = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{Q}$  为 TDOA 测量值的协方差对角矩阵,  $\mathbf{Q}$  的选择可以决定迭代算法的收敛速度。

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \text{rmse}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \text{rmse}^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

rmse 为 2 次迭代结果的差值:

$$\text{rmse} = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \quad (11)$$

本迭代算法的结束条件设置为 rmse(最近 2 次结果差值)小于 0.01 m, 结果精度为 1 cm, 迭代  $k$  次后的结果  $(x_k, y_k, v_k)$  为实际位置  $(x, y, v)$  的逼近值。

### 3 仿真误差分析

根据式(1)得出的定位精度主要受震动波速  $v$ , 阵列半径  $r$ , 时延误差  $\sigma$  和目标距离影响<sup>[19,20]</sup>。其中阵列半径  $r$  可以精确测量得到, 震动波速受地理环境影响较大, 时延误差  $\sigma$  每次测量都不一样, 为随机分布。所以影响定位精度的主要因素为波速  $v$ , 时延误差  $\sigma$  的影响。

仿真条件: 在 matlab 仿真环境下, 设定在塑性粘土中地波波速范围为 500~1000 m/s, 阵列半径为 50~100 m, 时延误差为 100  $\mu\text{s}$  和 1 ms, 目标距离为 500~1000 m。假定其中 2 个影响因素已知, 分别仿真另 2 个因素对计算误差的影响, 找出影响定位误差最大的因素, 即

(1) 假定时延误差和目标距离已知, 计算不同波速和阵列半径对定位误差的影响;

(2) 假定阵列半径和波速已知, 计算不同时延误差和目标距离对定位误差的影响;

(3) 假定时延误差和波速已知, 计算不同目标距离和阵列半径对定位误差的影响。

#### 3.1 距离精度分析

不同波速  $v$ , 阵列半径  $r$  下的距离误差如图 2 所示。设定目标点距离  $R=1000$  m, 时延误差  $\sigma = 100$   $\mu\text{s}$ 。

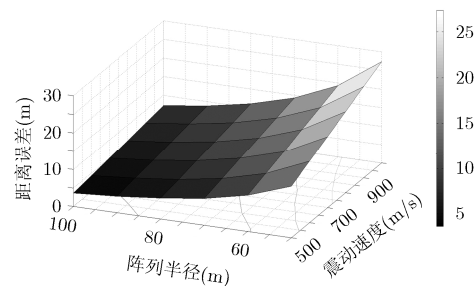


图2  $R=1000$  m, 时延误差 100  $\mu\text{s}$  的距离误差

从图 2 中可以得出, 距离误差随着波速  $v$  的增大而增大, 随着阵列半径  $r$  的增大而减小, 90 m 以上的阵列半径, 波速 500~900 m/s 的情况下, 距离

误差小于 10 m, 而 60 m 以下的阵列半径, 则距离误差受波速影响很大。

不同时延误差下的距离误差如图 3 所示。设定

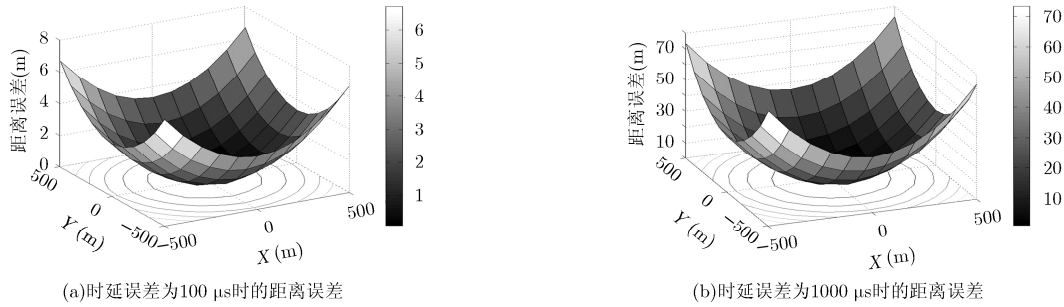


图 3  $r=100$  m,  $v=500$  m/s 的距离误差

阵列半径  $r=100$  m, 波速  $v=500$  m/s。

从图 3 中可以得出, 距离误差随着目标距离  $S$  的增大而增大, 随着时延误差  $\sigma$  的增大而增大, 阵列半径  $r=100$  m, 波速  $v=500$  m/s 的情况下, 距离误差受  $\sigma$  影响很大,  $\sigma$  为 1 ms 时, 500 m 距离的定位误差可以达到 70 m, 在 100  $\mu$ s 的情况下, 500 m 距离的定位误差可以控制到 10 m 以下, 所以传感器的采样频率至少应该大于 10 kbps。

不同目标距离, 阵列半径下的距离误差如图 4 所示。设定波速  $v=500$  m/s, 时延误差  $\sigma=100$   $\mu$ s。

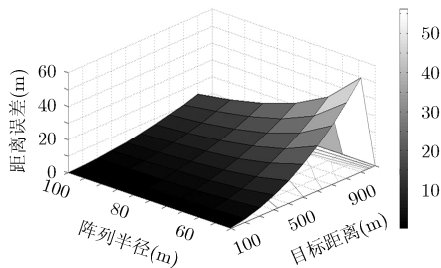


图 4  $v=500$  m/s, 时延误差 100  $\mu$ s 的距离误差

从图 4 中可以得出, 距离误差随着目标距离  $S$  的增大而增大, 随着阵列半径  $r$  的增大而减小, 90 m 以上的阵列半径, 波速 500 m/s 的情况下, 距离误差都小于 5 m, 而 60 m 以下的阵列半径, 距离误差受距离影响很大。综上所述, 距离误差受阵列半径, 目标距离, 波速和时延误差影响很大, 选择大的阵列半径可以抵消波速和目标距离的影响, 时延误差的影响可以通过提高采样频率和传感器阵列同步精度来改善。因此, 本实验采用阵列半径为  $r=100$  m, 采样频率为 10 kHz, 传感器同步时钟精度在 10  $\mu$ s。

## 4 炮弹落点实验

试验靶场为 1000 m  $\times$  1000 m 的滩涂空地, 靶场

无大型的沟渠, 土质为塑性粘土, 附近没有高强度的干扰源, 试射炮弹类型为直径 120 mm 的榴弹炮。炮弹发射间隔为 2~3 min, 为单发炮弹。这种情况下, 有足够的时间来收集震动数据和定位计算。通过比较提前测速的传统定位方法和本方法在波速测量和定位精度的差异, 来分析和改善定位算法和参数设置。

### 4.1 波速测量结果对比

提前测速需要 2 个传感器 A 和 B, 相隔一定距离  $M$ , 分别计算 P 波到时  $T_a, T_b$ , 最后算出波速为

$$V_s = \sum_1^N M / |(T_a - T_b)| \quad (12)$$

本实验设置测速装置距离  $M=100$  m, 实验次数  $N$  取 10。米字型阵列  $r=100$  m, 距离中心传感器距离  $R=200\sim 1000$  m。

比较米字型阵列波速计算结果和 A, B 传感器波速测量结果如表 1 所示。

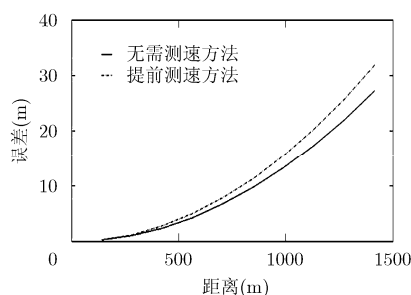
通过迭代方程计算出来的平均速度值为 575 m/s, 计算结果方差很小, 而人工测量误差在 8 m 左右, 误差为随机分布, 结果方差很大。测试对比发现, 无需测速的弹丸定位方法在波速估计上要比提前测速更准确, 因为提前测速需要人工计时, 必须进行多次计算结果平均, 而且必须事先制造震动源, 在实际应用时非常不方便, 因此无需测速的弹丸定位方法在工程应用上更加实用和准确。

### 4.2 无需测速和提前测速方法定位结果对比

试验设置: 不断改变定位阵列和靶心的距离, 提前测速和无需测速采用同一个阵列, 提前测速需要每次把步骤 4.1 测量的波速代入到定位方程中, 然后计算定位, 无需测速方法只需要把历史波速代入到方程中逐步求精来迭代定位, 比较两种方法和实际落点的误差值如图 5 所示。

表 1 提前测速方法采集数据

A, B 传感器波到 时刻间隔(ms)	预先波速 估计(m/s)	米字型阵列 计算结果(m/s)
170	588	576
168	595	574
180	555	574
175	571	575
172	581	576
160	625	576
165	606	577
178	561	573
170	588	573
179	558	575
平均波速(m/s)	583	575

图5  $r = 100$  m, 时延误差为  $100 \mu\text{s}$  的距离误差比较

无需测速方法由于把震动波速代入到迭代算法中, 逐步求精, 所以结果更精确, 定位误差也相对于提前测速方法更小, 提前测速方法预先利用 2 个传感器, 通过时差法估算震动波速, 震动波速作为常数代入到迭代算法中, 误差也同时代入到算法中, 最后导致定位的随机误差增大, 而且不同方向的爆炸点由于地理环境的不同导致每次爆炸产生的震动波速不尽相同, 所以震动波速作为常数参与每次的定位运算本身就会产生很大的误差。如图 5 所示, 阵列半径  $r = 100$  m, 时延误差  $\sigma = 100 \mu\text{s}$  的情况下, 无需测速迭代方法和提前测速迭代方法的定位误差比较, 在距离  $500 \sim 1000$  m 的范围内, 提前测速迭代方法比无需测速迭代方法定位误差高出  $5 \sim 10$  m。

## 5 结论

本文提出了一种无需测速的靶场弹丸落点定位迭代算法的设计实现, 进行了算法仿真设计和实验应用。通过对比预先测速迭代算法的定位误差, 得到了比较理想的测试结果, 波速估计和定位精度优于预先测速的迭代定位算法。本算法提高了靶场弹

丸落点定位系统的定位精度, 省略了预先测速的繁琐步骤, 使得靶场弹丸定位系统可以达到真正实际应用的目的。

## 参考文献

- [1] 朱伟勇. 基于 MATLAB 的微地震震源定位的研究与实现[D]. [硕士论文], 浙江工业大学, 2011. doi: 10.7666/d.y1921166. ZHU Weiyong. Based on the MATLAB micro earthquake source positioning of the research and implementation[D]. [Master dissertation]. Zhejiang University of Technology, 2011. doi: 10.7666/d.y1921166.
- [2] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微地震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2059-2067. DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong, et al. A method for identifying outlier signals for microseismic event based on arrival time difference[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(10): 2059-2067.
- [3] 马瑞恒, 钱汉明, 荣英佼, 等. 五元十字阵用于 2-D 远场目标精确定位的关键因素分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(2): 574-577. doi: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.02.186. MA Ruiheng, QIAN Hanming, RONG Yingjiao, et al. Analysis of the key factors impacting on precise localization of the 2-D far-field target using a planar five-element circle array[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 574-577. doi: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.02.186.
- [4] ALLEN R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1978, 68(5): 1521-1532.
- [5] 杨俊峰, 张丕状. 基于 DTOA/DOA 和牛顿迭代法的震源定位方法研究[J]. 地震研究, 2013, 36(3): 324-329. doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2013.03.011. YANG Junfeng and ZHANG Pizhuang. Research on seismic source localization method based on DTOA/DOA and Newton iterated algorithm[J]. *Journal of Seismological Research*, 2013, 36(3): 324-329. doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2013.03.011.
- [6] DAI H C and COLIN M B. Automatic picking of seismic arrivals in local earthquake data using an artificial neural Network[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 120(3): 758-774. doi: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb01851.x.
- [7] 宋叶志. MATLAB 数值分析与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 177-181. SONG Yezhi. MATLAB Numerical Analysis and Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 177-181.
- [8] Timothy Sauer. Numerical Analysis[M]. Fairfax: George Mason University, 2014: 205-210.
- [9] 马朝军, 狄长安, 孔德仁, 等. 基于地震波的弹丸落点定位模

- 型[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(7): 20–26. doi: 10.3969/j.issn.1006-0707.2012.07.008.
- MA Zhaojun, DI Chang-an, KONG Deren, *et al.* Landing point location model based on seismic wave[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(7): 20–26. doi: 10.3969/j.issn.1006-0707.2012.07.008.
- [10] 李楠, 王恩元, 孙珍玉, 等. 基于到时差值的微震波异常信号识别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1644–1661. doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.08.016.
- LI Nan, WANG Enyuan, SUN Zhenyu, *et al.* A method for identifying outlier signals for microseismic event based on arrival time difference[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1644–1661. doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.08.016.
- [11] HAOHONG D U. The design of a new type of TDOA-based local space mouse[C], IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2015: 1755–1760. doi: 10.1109/ICMA.2015.7237751.
- [12] GAMB I J M, RODRIGUEZ-TELJEIRO M C, and GARCIA DEL PINO M L. Newtonian and post-Newtonian passive geolocation by TDOA[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 51: 18–25. doi: 10.1016/j.ast.2016.01.016.
- [13] MENG Yufeng, XU Jiancheng, HUANG Yan, *et al.* Key factors of multi-station TDOA passive location study[C], International Conference on Intelligent Human-machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, 2015: 220–223. doi: 10.1109/IHMSC.2015.190.
- [14] GERSON S F and HAE Y K. Identification of pressed keys by time difference of arrivals of mechanical vibrations[J]. *Computers and Security*, 2016, 57(3): 93–105. doi: 10.1016/j.cose.2015.11.002.
- [15] QU Xiaomei and XIE Lihua. An efficient convex constrained weighted least squares source localization algorithm based on TDOA measurements[J]. *Signal Processing*, 2016, 119(2): 142–152. doi: 10.1016/j.sigpro.2015.08.001.
- [16] ZHONG Xionghu and HOPGOOD J R. A time-frequency masking based random finite set particle filtering method for multiple acoustic source detection and tracking[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2015, 23(12): 2356–2370. doi: 10.1109/TASLP.2015.2479041.
- [17] ZHU Guohui, FENG Dazheng, XIE Hu, *et al.* An approximately efficient bi-iterative method for source position and velocity estimation using TDOA and FDOA measurements[J]. *Signal Processing*, 2016, 125(8): 110–121. doi: 10.1016/j.sigpro.2015.12.013.
- [18] YIN Jihao, WAN Qun, YANG Shiwen, *et al.* A simple and accurate TDOA-AOA localization method using two stations [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 23(1): 144–148. doi: 10.1109/LSP.2015.2505138.
- [19] CANCLINI A, BESTAGINI P, ANTONACCI F, *et al.* A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2015, 23(10): 1563–1575. doi: 10.1109/TASLP.2015.2439040.
- [20] UYSAL C and FILIK T. A joint detection and localization method for non-cooperative DS-SS signals[C]. IEEE Military Communications Conference, Tampa, FL, 2015: 523–528. doi: 10.1109/MILCOM.2015.7357496.
- 李鹏宇: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线通信、物联网工程应用、加速度传感器研究和应用开发工作。
- 车录锋: 男, 1971 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事微传感器与执行器及其相关 MEMS 技术方面的研究。
- 郑春雷: 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 主要从事物联网协议和通信设备的研究工作。