

引用格式: 殷昊, 庞新良, 张震川. 三元次声阵定位火箭发射的方法[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 728-733. [YIN Hao, PANG Xinliang, ZHANG Zhenchuan. The method of locating rocket launching with ternary infrasonic array[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 728-733.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.021

三元次声阵定位火箭发射的方法

殷 昊, 庞新良, 张震川

(国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

摘要: 近些年来, 基于广义互相关时延估计、单阵定向多阵定位的次声定位技术得到了广泛研究, 针对时间差的获取提出了大量改进方法, 这些定位方法主要是针对远程次声源的定位。然而, 对于持续时间长达 3~4 min 且处于运动状态的次声事件的定位研究较少。提出了一种基于短时能量突变的方法进行时延估计, 并结合实际站台的分布情况采用三站定位方法对火箭发射事件进行定位。结果表明: 单个三元次声阵定向误差在 2° 以内, 距离误差约为 3.17%(实际的距离为 52.74 km, 定位误差为 1.67 km), 定位精度较高, 说明提出的时延估计定位方法是可行的。

关键词: 短时能量突变; 时延估计; 火箭发射; 次声三站定位

中图分类号: O42 TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-05-0728-06

The method of locating rocket launching with ternary infrasonic array

YIN Hao, PANG Xinliang, ZHANG Zhenchuan

(State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

Abstract: In recent years, infrasonic localization techniques based on generalized cross-correlation delay estimation and single-array directional multi-array localization have been widely studied, and many methods improving time difference measurement are presented. The existing localization methods are mainly used for locating remote infrasound sources. So far, only few studies have addressed the localization problem of moving infrasound events that last up to 3~4 minutes. In this paper, a time-delay estimation method based on short-time energy mutation is proposed, and a three-station localization method is used to locate rocket launch events according to the distribution of actual stations. The results show that the orientation error of a single ternary infrasound array is less than 2° and the distance error is about 3.17% in the case that the actual distance is 52.74 km and the locating error is 1.67 km, so the locating accuracy is higher. The research shows that the proposed time delay estimation locating method is feasible.

Key words: short-time energy mutation; time delay estimation; rocket launching; three-station location of infrasound

0 引 言

次声源定位是一种典型的被动式探测定位技术, 根据利用的信号信息和参数的不同, 可大致将定位技术分为四类: 利用信号的到达时间(Time of Arrival, TOA)定位、利用信号的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位、利用信号的到达方位角(Azimuth of Arrival, AOA)定位、利用接收信号的强度(Received Signal Strength, RSS)定位。其中, 基于到达时间差的定位方法定位精度较高, 实用性较强, 是目前应用与研究最广泛的一种声源定位方法。

常用的是基于互相关的时延估计方法, 其中最常用的方法主要是广义互相关法(Generalized Cross Correlation, GCC)。该方法被 Knapp 等^[1]于 1976 年提出, 其基本原理是在求取信号互相关函数之前对功率谱进行加权滤波, 突出信号并抑制噪声干扰部分, 从而突出相关函数在时延处的峰值, 取其峰值进行时延估计。广义互相关方法采用了众多加权函数^[2-6], 如由 Roth 提出的 Roth 加权函数(The Roth Processor, ROTH)、平滑相关变换(The Smoothed Coherence Transform, SCOT)、相位变换(The Phase Transform, PHAT)、最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计/HT(Hannan-Thomson)以及一些改善函数等, 起到锐化峰值、抑制噪声的作用。近几年来, 众多学者致力于 GCC 时延估计方法的改进, 小波变换^[7]、时频分析、希尔伯特变换^[8]、神经网络^[9]、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-05-21

作者简介: 殷昊(1995-), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向为核爆效应现象学和探测技术。

通信作者: 庞新良, E-mail: pangxinliang@sina.com

EMD)^[10]等方法被引入到时延估计方法中,能有效地进行非平稳环境下的时延估计。为了更进一步精确时延量,杨亦春等^[11]针对震前异常次声波一次GCC得到的时延量远远大于信号持续时间的情况,对信号采用二步法时延估计:第一步先根据能量分布粗略估计时延;第二步再用GCC法计算精确时延,最终的时延量为两次时延之和。考虑到一次互相关法受噪声影响较大,文献[12]提出了二次相关法,可在更低的信噪比环境下较准确地估计时延。

因为火箭发射的时间与发射点的位置明确,对于检测次声时延估计、定位算法等具有重要意义,具有重要的研究价值^[13]。火箭发射是一种运动次声源,其产生的次声波信号主要由火箭飞行时激发空气产生,因此近距离采集到的次声信号持续时间可长达3~4 min,甚至更久。文献[14]考虑到次声监测网络孔径较大且信号相关性较小,获取的时延估计值准确度不高,因此采用最小方差法对阵列周边的区域进行扫描,进而得出声源位置的估计值,与实际位置相差数十千米。唐伟等^[13]对朝鲜4.13“光明星3号”卫星发射次声信号进行分析,分别采用单台、两个次声台站两种方法对火箭爆炸区域进行估算。

由于次声波的远距离传播特性,大多数学者考虑的是次声源的远程定位。文献[15]中考虑在小于100 km的范围内,次声定位应用的缺乏,开发了一种srcLoc方法,该方法是一种近场、严格基于TDOA的声学定位方法,其优势主要在于没有限制性的大气假设,试验结果表明该方法在96%的站点上比传统的定位方法的定位精度提高了2倍以上。而火箭次声信号的持续时间较长,且声源并非静止的,难以识别判定不同发射阶段所产生的次声信号。因此,本文提出一种基于短时能量突变的时延估计方法对近场火箭发射次声信号进行定位。

1 火箭发射信号时延估计

基于TDOA的声源定位方法是利用传感器阵列各个阵元接收声信号因其传输过程中传播路径不同而引起的时间差,然后结合阵列的几何关系和时延量估计出声源的位置^[16],其包含时延估计和定位解算两部分,该定位算法的关键在于获取精确的时间差,利用时间差可以进一步确定声源的速度、方位和距离等参数。

1.1 信号特征分析

对某次三元阵采集到的火箭次声信号先进行

去除大气本底压力处理后,再采用0.01~20 Hz的带通滤波器对信号进行去噪,得到的信号波形如图1所示,其中图1(a)、1(b)、1(c)分别表示1、2、3号传感器采集到的次声信号进行滤波后的波形图,横坐标表示的是次声信号到达传感器的时刻。从图1可以看到,随着时间的增加,次声信号波形逐渐增强,有几个起伏,然后慢慢消失,波形持续时间长、强度高,这符合典型的液体燃料发动机产生的次声信号波形特征^[17],与实际情况相符。

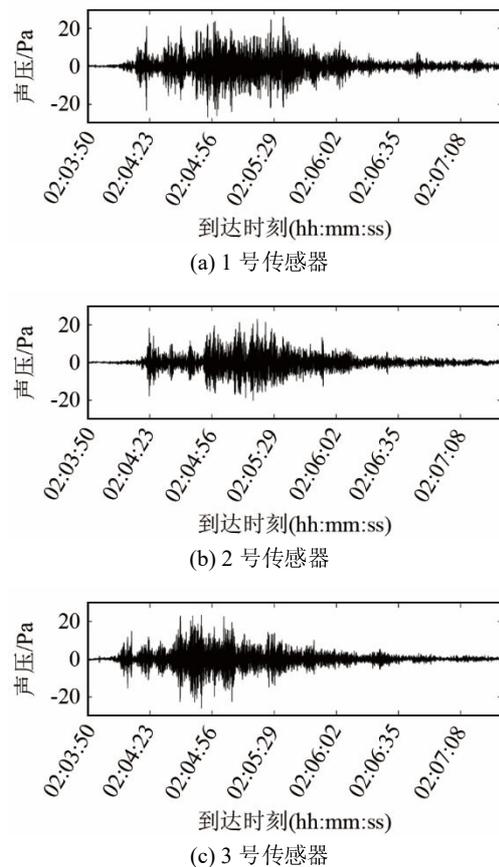


图1 不同传感器接收的滤波后次声信号
Fig.1 The filtered infrasound signals received by different sensors

次声信号的频谱图如图2所示,此次火箭发射次声信号的频率范围是4~12 Hz。次声源到达三个传感器的传播路径存在差异,在传播过程中的衰减程度不一致,且火箭发射次声源一直处于运动状态,多普勒效应会引起次声信号的幅值和相位的偏移,每个传感器接收到的次声信号的频带范围存在差异。

由于火箭次声信号持续时间长达3~4 min,且声源位置相对于传感器阵列位置一直在发生变化,继续采用峰值检测或者广义互相关法求时间差的方法误差较大,所以本文提出一种基于信号短时能量突变的时延估计算法,首先获得接收信号的各个传感器之间的时间差,再对其进行位置解算。

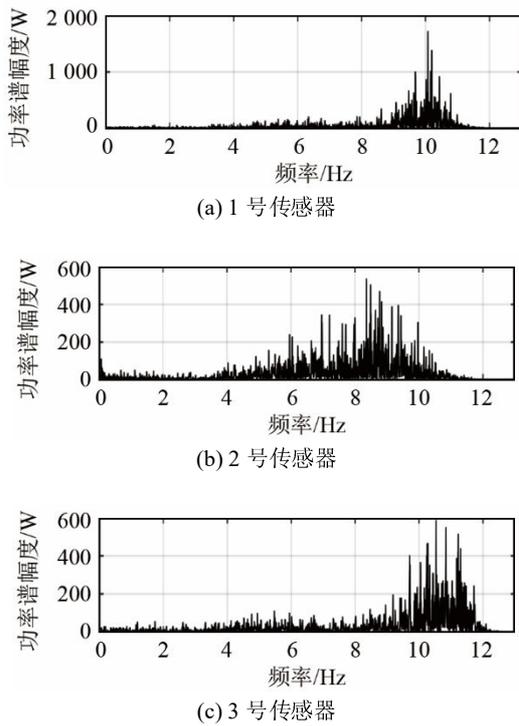


图2 相应的次声信号的频谱图

Fig.2 The corresponding spectrum diagrams of the infrasound signals

1.2 火箭发射次声信号短时能量突变

当火箭发射产生的次声信号到达各个传感器时,传感器输出的次声信号能量会发生突变。一般地,无次声事件发生时,次声传感器接收到的信号能量幅度较低且波动起伏不大。因此,当传感器接收到火箭发射产生的次声信号时,传感器输出的信号能量幅值会发生突变且幅值较大,即火箭次声信号到达传感器的时间点就是信号能量发生突变的位置。实际上,传感器接收到的次声信号不仅包含火箭发射产生的次声信号,还包含其他噪声信号,如风噪声等,有用信号与噪声信号的叠加导致不能准确地确定火箭发射次声信号能量突变的位置,即不能准确确定次声信号到达传感器的时间点。次声探测站的传感器接收到的信号在一定程度上是经过玫瑰状降噪管过滤了一部分噪声后的信号,因此虽然还有其他无用信号的存在,但仍然可以认为火箭发射次声信号到达各个传感器的时间大约在信号能量发生突变的位置。信号能量发生突变位置的附近区域相对更容易找到,因此首先可以先找到包含信号到达传感器时间点的该区域。火箭发射产生的次声信号持续时间较长,通过对次声信号进行加窗计算,计算窗内的信号能量(即短时能量),先找出次声信号能量发生突变的区域^[18]。

设第 i 个时间窗内次声信号的短时能量计算公式^[18]为

$$E_i = \sum_{l=0}^{+\infty} [s(l) \cdot w(l-i)]^2, \quad i=0,1,2,\dots \quad (1)$$

式中, $s(\cdot)$ 表示火箭发射产生的次声信号; $w(\cdot)$ 为窗函数,此处窗函数选为矩形窗。本文采集到的火箭发射次声信号数据较长,因此选取窗长为 1 000。定义矩形窗函数的窗长为 N , 其函数表达式为

$$w(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)计算得到次声信号的短时能量序列 $\{E_i, i=0,1,2,\dots\}$ 后,可以大致看出信号的能量变化情况。假设次声信号首先在第 I 个时间窗内发生能量突变,计算该时间窗内的次声信号的瞬时能量:

$$E_i(l) = s^2(l+I), \quad l=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

图3为三个传感器接收到的火箭发射产生的次声信号根据上述过程计算的短时能量的结果。

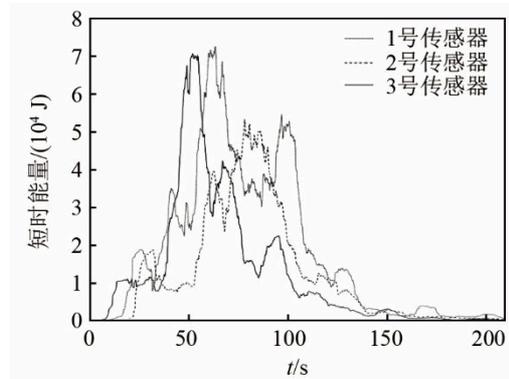


图3 相应的次声信号的短时能量曲线

Fig.3 The corresponding short-time energy curves of the infrasound signals

图4为对火箭发射次声信号的短时能量值进行相邻能量点之间计算差值后的能量突变幅度的曲线。可以明显地看出,次声信号的能量变化存在多个极值,即火箭发射过程中,有多个阶段产生了次声信号。

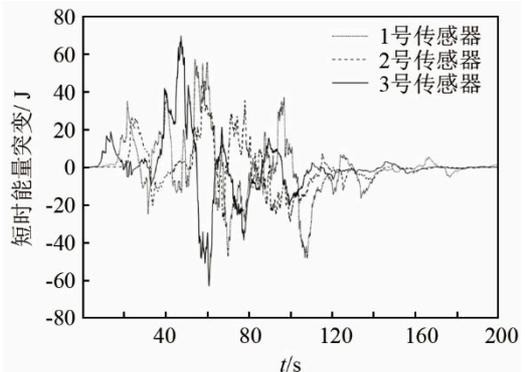


图4 短时能量突变幅度曲线

Fig.4 The amplitude curves of short-time energy mutation

图5为传感器接收到的信号首次发生能量突变的时间窗内的次声信号能量变化幅值情况的曲线。

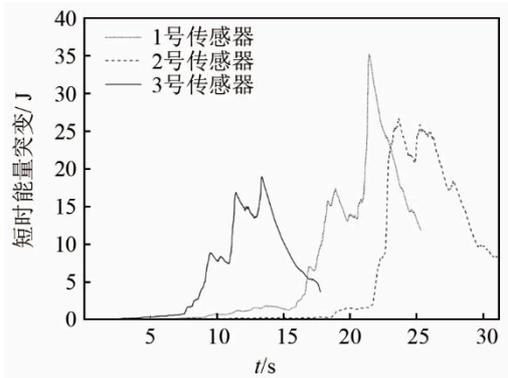


图 5 短时能量突变时间窗内能量变化曲线

Fig.5 Energy change curves within the time window of short-time energy mutation

即火箭发射次声信号到达传感器的时间点包含在该时间窗内。

1.3 火箭次声信号时间差估计

设两两传感器之间的时间差为 $t_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ ，若 $t_{ij} < 0$ ，说明次声波信号先到达第 i 号传感器，后到达第 j 号传感器。理想情况下，闭环三元阵的时间差闭环和等于 0，即传感器之间的延时量满足

$$t_{12} + t_{23} + t_{31} = 0 \quad (4)$$

而在实际情况中，由于噪声和大气传播路径的复杂性，闭环系统延时量之和只能趋于 $0^{[19-20]}$ ，即：

$$t_{123} = t_{12} + t_{23} + t_{31} < \epsilon \quad (5)$$

根据图 5 可知，信号能量突变幅度在整个信号持续时间范围内出现多个极大值，根据各路信号能量突变幅度设置峰值检测的条件获取时间差。本文设置 1 号传感器最小峰值高度为 1.5，2 号传感器最小峰值高度为 1.5，3 号传感器最小峰值高度为 0.4，检测峰值的时间间隔为 25 个采样点。可得到多个满足条件的位置，采用第一个位置为信号到达时间点，进而求解出本文中的次声事件根据上述方法得到的时间差为

$$t_{12} = -7.05 \text{ s}, t_{31} = -7.34 \text{ s}, t_{23} = 14.39 \text{ s} \quad (6)$$

计算 $t_{12} + t_{23} + t_{31} = 0$ ，满足条件。

2 近场次声源的三站定位方法

对采集到的次声信号进行频谱分析，火箭次声波频率集中在 4~12 Hz 之间，相应波长 λ 约为 27~81 m，由于声源 S 与阵列之间的距离 d 满足：

$$d \leq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (7)$$

此时声源 S 处于近场范围，需要按照球面波来计算。

2.1 基于时间差的三站定位原理

基于时间差的次声定位技术主要是利用到达

任意两个传感器之间的时间差，并结合传感器阵列之间的几何关系^[21]，进而确定声源位置。

三元阵中传感器的位置关系如图 6 所示。根据三元阵的经纬度坐标可计算出三个传感器之间的距离：

$$L_{12} = 2.8566 \text{ km}, L_{13} = 3.4177 \text{ km}, L_{23} = 4.7711 \text{ km} \quad (8)$$

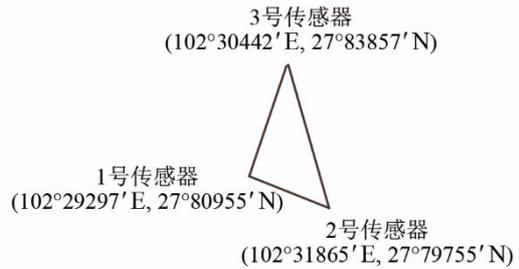


图 6 三元阵位置示意图

Fig.6 The position diagram of tripartite array

建立如图 7 所示的次声三元阵，以其中一个阵元为原点，正北方向为 Y 轴正向、正东方向为 X 轴正向建立平面直角坐标系。本文中， A 、 B 、 C 三点表示 3 号、1 号、2 号传感器所在位置。

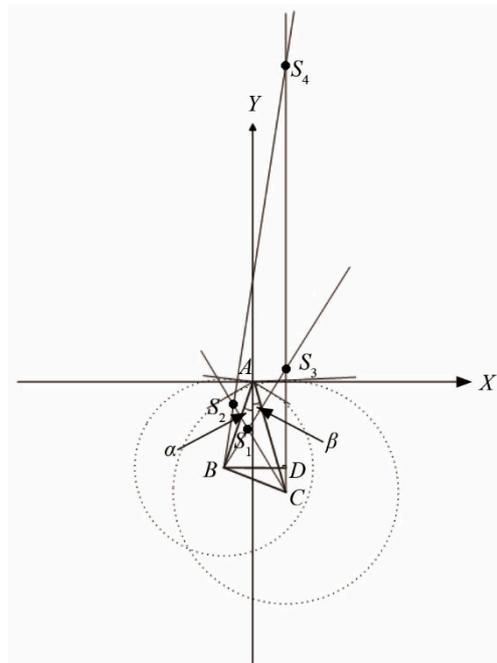


图 7 三元次声阵列定位原理图

Fig.7 Locating principle diagram of the ternate infrasound array

假设某一火箭发射事件发生后，三个传感器接收到次声信号的时间为： t_1 、 t_2 和 t_3 ，若 A 点最先接收到次声信号，以 B 点为圆心，声速 vt_3 为半径画圆，其中 v 为声速，从 A 点向该圆画两条切线，连接 B 和两个切点做法线，这两个法线方向即为可能的来波方向；同理，以 C 点为圆心， vt_3 为半径

画圆,从 A 点向该圆做两条切线,连接 C 和两个切点做法线,这两个法线方向即为可能的另外两个来波方向;两两来波方向相交于四个点 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ,这 4 个点即为可能的发射点。

根据式(8)的阵元间距,再结合正弦定理即可得到三元阵的夹角以及相对于正北方向的夹角: $\angle ABC$ 、 $\angle ACB$ 、 $\angle BAC$ 、 L_{AB} 、 L_{BC} 、 L_{AC} 、 α 和 β 。假如次声波最先到达 3 号传感器即 A 点, A 点和 B 点的时间差获得来波方向为 BS_1 和 BS_4 , A 点和 C 点间的时间差获得来波方向为 CS_1 和 CS_4 。 AB 的来波方向和 AC 的来波方向相交得到 4 个点: S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ,这四个点即为可能的发射点(v 为声速):

$$\angle S_4CB = \angle ACB - \arccos(t_{23}v/L_{AC}) \quad (9)$$

$$\angle S_4BA = \arccos(t_{13}v) \quad (10)$$

过点 B 作 $BD \perp CS_4$ 交 S_4C 于点 D ,
 $\angle S_4BD = \angle ABC - (90^\circ - \angle DCB) + \angle S_4BA =$
 $\angle ABC + \angle S_4BA + \angle S_4CB - 90^\circ \quad (11)$

$$L_{S_4B} = L_{BD} / \cos(\angle S_4BD) =$$

$$L_{BC} \sin(\angle S_4CB) / \cos(\angle S_4BD) \quad (12)$$

$$L_{S_4A} = [L_{AB}^2 + L_{S_4B}^2 - 2L_{AB}L_{S_4B} \cos(\angle S_4BA)]^{1/2} \quad (13)$$

$$\angle S_4AB = \arccos[(L_{AB}^2 + L_{S_4A}^2 - L_{S_4B}^2) / (2L_{AB}L_{S_4A})] \quad (14)$$

由此可得 S_4 的方位角为: $\varphi = -180^\circ + \angle S_4AB + \alpha$ 。此处 φ 表示目标点与正北方向的夹角,设 γ 为目标点与正东方向的夹角,得到最终的方位角为:
 $\gamma = 90^\circ - \varphi$ 。

同理,可得到其余可能的发射点的方位角和距离。从实际工程应用方面考虑,可排除在阵内的发射点 S_1 。再将得到的其余三个可能发射点到三个阵元的距离长短与次声到达时间进行逻辑判断,若某发射点到 1 号传感器的距离大于到 2 号传感器的距离,而 $t_1 < t_2$,从逻辑上排除该发射点。从排除后剩下的点中计算发射点声波传输到 B 点和 C 点的实测波程差与计算得到的波程差中选择误差最小的,即为实际发射点。

2.2 定位算法实现框图

采用编程语言进行定位算法的实现,框图如图 8 所示。

2.3 定位结果

采用第 1 节得出的时延量代入上述的定位方法进行试验,根据最小波程差得到声速 $v = 325.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,进行定位计算距离 A 点为 54.412 km ,与正东方向的夹角为 118.9843° 。与实际位置对比,定向误差在 2° 以内,距离误差约为 3.17% 。

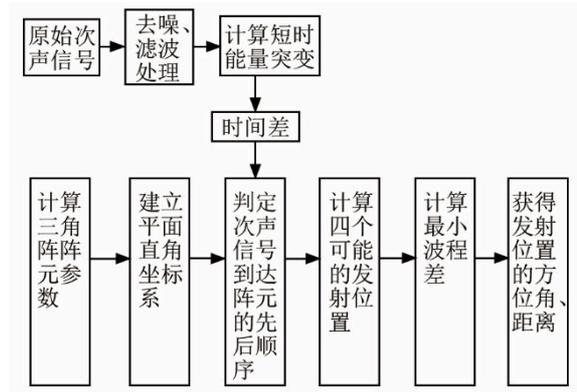


图 8 三元次声阵的定位算法流程图
 Fig.8 Flowchart of locating algorithm of the ternate infrasound array

3 结论

从火箭发射次声信号波形看出,火箭发射次声信号持续时间较其他次声事件波形较长,且由于火箭发射是一种运动次声源,采用峰值检测或广义互相关等方法进行时延估计误差较大。因此本文采用了一种基于短时能量突变进行时延估计,并采用近场的三站定位方法进行定位解算,求解结果与实际情况方位角相差在 2° 以内,距离误差约为 3.17% ,定位精度较高。

参 考 文 献

- [1] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [2] ROTH P R. Effective measurements using digital signal analysis[J]. IEEE Spectrum, 1971, 8(4): 62-70.
- [3] CARTER G C, NUTTALL A H, CABLE P G. The smoothed coherence transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(10): 1497-1498.
- [4] KUHN J. Detection performance of the smooth coherence transform (SCOT)[C]//ICASSP '78. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Tulsa, OK, USA. IEEE, 1978: 678-683.
- [5] SCARBROUGH K, AHMED N, YOUN D, et al. On the Scot and Roth algorithms for time delay estimation[C]//ICASSP '82. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Paris, France. IEEE, 1982: 371-374.
- [6] MENG L, LI X H, ZHANG W G, et al. The generalized cross-correlation method for time delay estimation of infrasound signal[C]//2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Qinhuangdao, China. IEEE, 2015: 1320-1323.
- [7] 余文品, 何琳, 崔立林, 等. 声源定位中的时延估计方法研究进展[C]//2016 年度声学技术学术会议论文集. 武汉, 2016: 236-245.
- [8] 王锋, 刘鹏远, 李兵. 相关 Hilbert 差值时延估计方法误差分析[J]. 中国测试, 2015, 41(12): 14-16, 24.
 WANG Feng, LIU Pengyuan, LI Bing. Error analysis of TDE based on correlation Hilbert transform[J]. China Measurement &

- Test, 2015, **41**(12): 14-16, 24.
- [9] 祖丽楠, 吴秀谦. 一种基于神经网络滤波的广义互相关时延估计方法的设计[J]. 化工自动化及仪表, 2012, **39**(8): 1023-1025.
ZU Linan, WU Xiuqian. Design of generalized cross-correlation time-delay estimation based on neural network filtering[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012, **39**(8): 1023-1025.
- [10] 路晓妹, 寇文珍, 段渭军. 基于 EMD 分解重构的互相关时延估计方法[J]. 测控技术, 2013, **32**(7): 45-48, 56.
LU Xiaomei, KOU Wenzhen, DUAN Weijun. Cross-correlation delay estimation method based on EMD decomposition and reconstruction algorithm[J]. Measurement & Control Technology, 2013, **32**(7): 45-48, 56.
- [11] 杨亦春, 郭泉, 吕君, 等. 大地震前出现的异常次声波观测研究[J]. 物理学报, 2014, **63**(13): 134302.
YANG Yichun, GUO Quan, LÜ Jun, et al. Observation and study of precursor infrasound waves emitted before several strong earthquakes[J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(13): 134302.
- [12] 殷恒刚. 基于小波变换二次相关时延估计算法的声定位技术及试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [13] 唐伟, 刘俊民, 王晓明, 等. 朝鲜 4.13 “光明星 3 号” 卫星发射次声信号分析[J]. 环境工程, 2013, **31**(1): 81-84, 102.
TANG Wei, LIU Junmin, WANG Xiaoming, et al. Analysis of infrasound generated by the satellite guangmingxing 3 launched on 13th April[J]. Environmental Engineering, 2013, **31**(1): 81-84, 102.
- [14] 郭泉, 杨选辉. 运载火箭发射过程的次声波近场观测[C]//第十一届国家安全地球物理专题研讨会论文集. 西安, 2015: 212-216.
- [15] SZUBERLA C A L, OLSON J V, ARNOULT K M. Explosion localization via infrasound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, **126**(5): EL112-EL116.
- [16] 魏新元. 基于广域传感器网络的次声源定位关键技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [17] 文雨迪, 任文涛, 杨宇, 等. CZ-7 遥 2 运载火箭发射次声信号分析研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, **40**(9): 70-73.
WEN Yudi, REN Wentao, YANG Yu, et al. Analysis of infrasound signals generated by CZ-7 teleport 2 launch vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, **40**(9): 70-73.
- [18] 王阳, 窦甲臣, 费春国, 等. 基于短时能量时延估计的地震动目标定位方法[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(24): 164-170.
WANG Yang, DOU Jiachen, FEI Chunguo, et al. A seismic target localization method based on short-time energy time delay estimation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, **39**(24): 164-170.
- [19] PICHON A L, CANSI Y. PMCC for infrasound data processing[J]. Inframatics, 2003(2): 1-9.
- [20] 杨庆生, 丁浩亮, 夏雅琴. 三点阵次声源定位估算法[J]. 北京工业大学学报, 2017, **43**(6): 819-825.
YANG Qingsheng, DING Haoliang, XIA Yaqin. Source location of infrasonic by tripartite array arithmetic[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, **43**(6): 819-825.
- [21] PANG X L, WANG Y, MA Y, et al. Research on three-station location method for nuclear explosion infrasound detection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, **727-728**: 651-655.