

引用格式: 尚楚翔, 滕鹏晓, 吕君, 等. 大气次声源定位算法及误差分析[J]. 声学技术, 2020, 39(3): 360-365. [SHANG Chuxiang, TENG Pengxiao, LYU Jun, et al. Localization algorithm for infrasound source in air and its error analysis[J]. Technical Acoustics, 39(3): 360-365.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.03.018

大气次声源定位算法及误差分析

尚楚翔^{1,2}, 滕鹏晓¹, 吕君¹, 杨军^{1,2}, 程巍^{1,2}

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要: 逐步多通道相关方法是定位次声源的主要方法。该方法会忽略阵元的海拔高度差, 从而引入误差。文章分析了基于广义互相关的时间延迟估计算法, 讨论了基于时延的平面波入射角定位方法。着重研究了逐步多通道相关方法的误差来源, 确定了基于时延的定位方法是产生误差的主要原因, 明确了大气次声源定位误差来源于忽略了阵元间的海拔高度差。基于最小二乘法推导了在不考虑阵元高度的情况下计算次声波入射角的方法。对存在高度差的 4 元中心三角阵型进行了误差仿真实验, 在忽略阵元海拔高度差的条件下, 各方向入射的次声波角度定位误差最大达到 4°, 特定阵型的阵元最大海拔高度差与入射角度计算误差成线性关系, 并探讨了入射角度计算误差对主要参数和后续定位的影响。

关键词: 次声定位; 逐步多通道相关方法; 误差分析

中图分类号: O425

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-03-0360-06

Localization algorithm for infrasound source in air and its error analysis

SHANG Chuxiang^{1,2}, TENG Pengxiao¹, LYU Jun¹, YANG Jun^{1,2}, CHENG Wei^{1,2}

(1. The Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The progressive multi-channel correlation (PMCC) method is the primary method for locating the infrasound source. However, this method introduces errors due to ignoring the altitude difference between array elements. In this paper, the time delay estimation algorithm based on the generalized cross-correlation is analyzed; the localization method based on incident angles of the plane wave with time delay is discussed; the source of errors of the progressive multi-channel correlation method is studied, and it is determined that the errors of the infrasound source localization come from ignoring the altitude difference between array elements. Based on the least squares method, the method of calculating the incident angles of the infrasound wave without considering element height is derived. The error simulation experiment of the triangular quaternion array with element height difference is carried out. The maximum localization errors in all directions under the condition of ignoring the altitude difference between array elements are 4°. The relationship between the maximum element altitude difference and the incident angle computation error is linear. The influence of the incident angle computation error on the main parameters and subsequent localization is discussed.

Key words: infrasound localization; progressive multi-channel correlation method (PMCC); error analysis

0 引言

自然事件和人类活动会伴有次声信号产生。大气中的次声源主要包括 3 种^[1]: 人为制造的脉冲信号; 陨石、火山喷发、地震等自然灾害; 对流层中

的大气扰动。由于大气层中存在温度和风向的分层结构, 次声因其频率低、衰减小的特点, 可以在大气中形成次声波导, 传播上千千米而没有明显的能量损失^[2], 因此逐渐成为陨石、火山、核爆炸次声源定位的有效技术和实用方法。

文献[2-3]中根据已有的地震探测技术, 提出逐步多通道相关方法(Progressive Multi-channel Correlation Method, PMCC)。通过次声信号检测方法和声达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)算法, 可以计算出不同频段下次声波到达阵列的方位角和俯仰角。1996 年, 全面禁止核试验条约组织

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(11774372、11874389)资助项目。

作者简介: 尚楚翔(1994—), 男, 吉林吉林人, 硕士研究生, 研究方向为大气声学。

通讯作者: 滕鹏晓, E-mail: px.teng@mail.ioa.ac.cn

(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization, CTBTO) 成立, 构建了国际监测系统 (International Monitoring System, IMS), 将次声作为核爆炸监测定位和当量估计的手段之一。IMS 在全球设有 60 个次声监测站, 保证任何位置发生当量大于 1 kt 以上的核爆炸至少能被 2 个监测站探测到, 并使用 PMCC 方法对其定位。每个监测站采用 4 元次声阵列, 阵列形状为中心一点, 其余三点组成三角形^[4]。1996 年, 谢金来^[5-6]建立了中国科学院声学研究所核爆炸次声波监测系统, 包括北京香山次声站、昆明次声站和杭州次声站。监测系统采用 4 元方阵, 实现了四点定向、两阵定位的次声监测网络。Kennett 等^[7]通过增加阵元数目解决了 IMS 中 4 元中心三角阵列对高频信号出现混叠现象的问题, 此后监测站逐步升级为 8 元或 9 元阵列。次声阵列监测系统不仅可以在最优置信度、实时性和灵敏度三方面显著提高核爆炸监测能力, 还可以用于全球环境、人为灾害和自然灾害的监测^[6]。

目前, CTBTO 成员国研究人员广泛采用两个或多个阵列的地理坐标及其测得的多个方位角, 通过在地球坐标系上进行测绘, 定位次声源的经纬度。由于在阵列布置时, 各阵元无法保证高度一致, 忽略阵元间的高度差, 方位角的计算结果会存在一定的误差。本文基于最小二乘法, 通过分析 PMCC 方法的主要流程, 确定其次声源定位的主要误差来源, 推导了在考虑和忽略阵元间高度差时计算次声波入射角的方法, 针对特定阵型仿真模拟实现各方向入射次声波的定位误差可视化, 研究最大海拔高度差和入射角计算误差之间的关系, 并讨论了入射角的计算误差对后续定位的影响。

1 理论模型

PMCC 方法主要包含次声信号检测方法和定位算法。其中定位算法采用 TDOA 算法, 包括时间延迟估计 (Time Delay Estimation, TDE) 和基于时延的定位方法两部分。次声波在大气远距离传播过程中, 不同频率的声波路径存在差异, 到达阵列的入射角度不同^[8], 因此在定位前会先将各阵元的接收信号通过多个带通滤波器进行分频处理, 以实现对不同频率次声波的定位计算。

1.1 时间延迟估计

TDE 方法大致可包括最小均方 (Least Mean Square, LMS) 自适应滤波器法、自适应特征值分解法、声学传递函数比法等^[9]。PMCC 方法采用广义互

相关 (Generalized Cross-Correlation, GCC)^[10] 算法估计次声信号到达阵元的时间延迟。其原理相当于将接收信号进行前置滤波, 适当消除噪声及干扰的影响后再进行相关运算, 取其峰值进行时延估计, 以提高时延估计的精度, 具体流程如图 1 所示。图 1 中 FFT 表示快速傅里叶变换, IFFT 表示快速傅里叶逆变换。

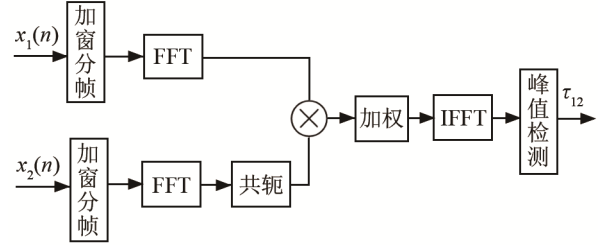


图 1 广义互相关估计时延流程图
Fig.1 Flow chart of generalized cross-correlation estimation of time delay

对于两个阵元接收到的信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$, 简化模型后可以表示为

$$\begin{cases} x_1(n) = \alpha_1 s(n) + v_1(n) \\ x_2(n) = \alpha_2 s(n + \tau) + v_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $s(n)$ 为次声源信号, $\alpha_i (i=1, 2)$ 表示次声信号到达阵元 i 的衰减系数, v_i 表示阵元 i 处的噪声信号。假设噪声信号与声源信号互不相关, 噪声信号之间互不相关, 互功率谱表示为

$$\Phi_{x_1 x_2}(\omega) = \alpha_1 \alpha_2 E \{ |S(\omega)|^2 \} e^{-j\omega \tau_{12}} \quad (2)$$

广义互相关定义为

$$R_{GCC}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\omega) \Phi_{x_1 x_2}(\omega) e^{j\omega \tau} d\omega \quad (3)$$

其中: $\psi(\omega)$ 为加权函数, 相当于前置滤波作用。文献[10]给出了多种通用的加权函数, PMCC 方法主要使用 HB (Hassab-Boucher) 加权函数, 其表达式为

$$\psi(\omega) = \frac{|\Phi_{x_1 x_2}(\omega)|}{\Phi_{x_1 x_1}(\omega) \Phi_{x_2 x_2}(\omega)} \quad (4)$$

其中: $\Phi_{x_i x_i}(\omega), i=1, 2$ 表示信号的功率谱。

在实际应用中, 使用信号频谱相乘估计功率谱, 相关函数的最大峰会被弱化, 同时噪声的相关性也会对结果产生影响。因此布置次声阵列通常选择背景噪声较小的位置, 并且较大的阵元间距可以减小噪声相关性。

1.2 信号一致性阈值检测

目前 CTBTO 主要采用 8 元或 9 元阵列构建 IMS 监测站, 由大尺寸的 5 元阵列嵌套小尺寸的 3 元或 4 元阵列组成。根据次声波长, 阵元间距通常设定在 1~3 km。较大的阵元间距可以减少空间噪声的相关性, 提高广义互相关加权的滤波性能。同时可以增加声波到达阵元的时延, 减小读取时延数据的

测量误差对后续定位的影响。但阵元间距太大会使信号本身的互相关性下降,并且当阵元间距超过信号高频部分的半波长时,时延计算会出现空间混叠现象。可以看作两个阵元接收了不同周期内的高频信号,互相关函数会出现多个峰值,导致时延估计错误。

次声阵列 R_n 的任意 3 元子阵列 (i, j, k) 接收次声源信号的时延满足闭合时间关系:

$$\tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} = 0 \quad (5)$$

由于背景噪声的相位具有随机性,并且读取时延数据存在测量误差,闭合时间关系无法严格满足。修正闭合时间关系更改为^[11]

$$\begin{cases} r_{ijk} = \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \\ c_n = \sqrt{\frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i>j>k} r_{ijk}^2} \end{cases}, \quad i, j, k \in R_n \quad (6)$$

当阵列的修正闭合时间关系在阈值 $c_{\text{threshold}}$ 范围内,说明阵元位置有效,否则说明某阵元位置干扰过大导致时延计算出现了较大误差。

为检测次声源信号并且避免高频信号出现混叠,检测过程会从小尺寸的 3 元阵列出发,逐步扩大阵型以提高计算精度。这种方式体现 PMCC 方法的逐级性,如图 2 所示。

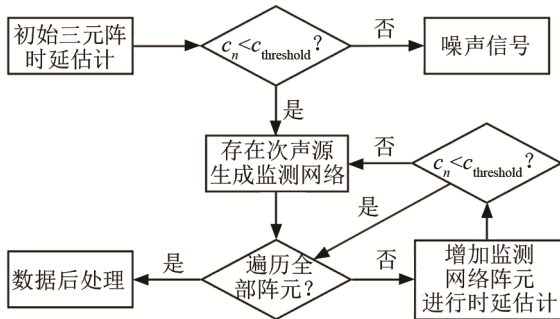


图 2 PMCC 方法的逐级检测
Fig.2 Progressive detection by PMCC method

在监测过程中,需先排除连续零信号的传声器。当初始三元阵的接收信号时延满足修正闭合时间关系时,说明存在次声源,生成次声源监测子网络。逐个添加其他阵元,计算子网络的修正闭合时间关系并进行阈值判断,如果满足阈值范围则保留该阵元。遍历全部阵元后利用监测网络进行后续定位。

1.3 基于时延的定位方法

在获取不同频率次声信号到达各阵元的时间延迟后,可通过几何定位法或目标函数搜索法计算入射角。考虑到次声远距离传播的路径远大于阵列尺寸,声波到达阵列可视为平面波,入射角采用最小二乘法利用多通道时延进行计算。

图 3 为任意阵列示意图。设入射信号方向为

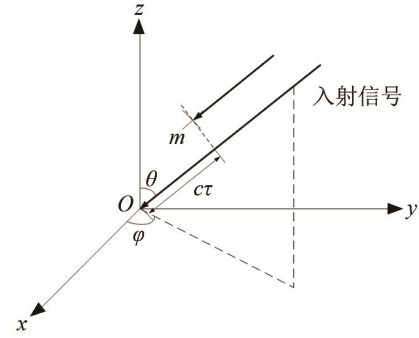


图 3 任意阵列示意图
Fig.3 Schematic diagram of arbitrary array

$\mathbf{r} = [-\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta]$, 其中方位角为 φ (与 x 轴夹角), 俯仰角为 θ (与 z 轴夹角); 阵元 m 的坐标为 $\mathbf{p}_m = (x_m, y_m, z_m)$; c 表示当地声速; τ_{ij} 表示阵元 i 相对于阵元 j 的延迟, 正值表示信号先到阵元 j 、后到阵元 i , τ_{ji} 可以表示为^[12]

$$\tau_{ji} = \frac{\langle \mathbf{p}_{ji}, \mathbf{r} \rangle}{c} = -\frac{1}{c} [(x_j - x_i) \sin \theta \cos \varphi + (y_j - y_i) \sin \theta \sin \varphi + (z_j - z_i) \cos \theta] \quad (7)$$

在实际测量中,阵元的地理坐标、采集设备和环境因素都有可能造成式(7)不严格相等,用误差表示为

$$\varepsilon = \tau_{ji} - \frac{\langle \mathbf{p}_{ji}, \mathbf{r} \rangle}{c} = \tau_{ji} + \frac{1}{c} [(x_j - x_i) \sin \theta \cos \varphi + (y_j - y_i) \sin \theta \sin \varphi + (z_j - z_i) \cos \theta] \quad (8)$$

n 个阵元的误差线性方程组可写为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} & z_n - z_{n-1} \\ x_1 - x_n & y_1 - y_n & z_1 - z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \cdot \tau_{2,1} \\ c \cdot \tau_{3,2} \\ \vdots \\ c \cdot \tau_{n,n-1} \\ c \cdot \tau_{1,n} \end{bmatrix} = -\mathbf{A} \mathbf{r}^T + \mathbf{b} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{e}$ 为误差向量, $\mathbf{A}$ 为位置矩阵, $\mathbf{b}$ 为声程差向量。在最小二乘意义下,估计误差的模的平方和

$$J = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (10)$$

式(10)取最小值,可得到:

$$\begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix} = -\mathbf{r}^T = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (11)$$

视速度 V 是表示次声信号的重要参数,由本地声速和俯仰角决定:

$$V = \frac{c}{\sin \theta} \quad (12)$$

为了进一步滤除干扰信号,在时频域对计算结果进行聚类。

接收信号经过连续时间窗和分频处理后，通过时延定位可以得到由独立单元组成的时频图^[13]，每个独立单元成为聚类的检测点，如图4(a)所示。每个检测点 P_i 由时间 t_i 、频率 f_i 、视速度 V_i 和方位角 φ_i 表示，应用权重欧几里得距离表示相邻时间窗或频带之间检测点的距离^[11]：

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{\frac{(t_2 - t_1)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(f_2 - f_1)^2}{\sigma_f^2} + \frac{(V_2 - V_1)^2}{\sigma_V^2} + \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)^2}{\sigma_\varphi^2}} \quad (13)$$

其中： σ 表示对应参数的权值。设定阈值 $d_{\max}$ ，当时频图中两个相邻检测点的距离在阈值范围内，这两个检测点同属于一类信号。当类中检测点数量大于建立族所需要的最小数目时，建立一个PMCC族。图4(a)为聚类前的时频图，灰色检测点距离相邻的黑色检测点较远，在进行聚类后形成只包含黑色检测点的PMCC族，如图4(b)。建立PMCC族有效地排除了外界扰动信号，提高定位算法的抗干扰能力。

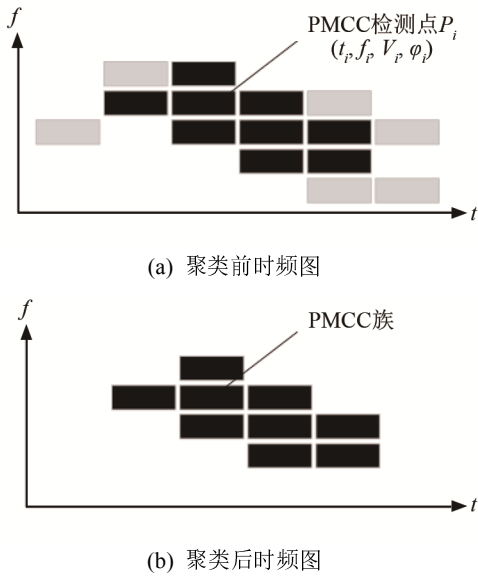


图4 聚类前后检测信号的变化

Fig.4 Changes in detection signals before and after clustering

2 误差分析

在实际应用中，阵元的地理位置使用经纬度表示，不考虑其海拔高度，阵元 m 的坐标取为 $p_m = (x_m, y_m)$ 。此时式(9)中 A 变为 $n \times 2$ 维矩阵：

$$A' = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \\ x_1 - x_n & y_1 - y_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时误差向量表示为

$$e' = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \\ x_1 - x_n & y_1 - y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \cdot \tau_{2,1} \\ c \cdot \tau_{3,2} \\ \vdots \\ c \cdot \tau_{n,n-1} \\ c \cdot \tau_{1,n} \end{bmatrix} = -A' r'^T + b \quad (15)$$

同样利用最小二乘法得到入射角度：

$$\begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} = -r'^T = -(A'^T A')^{-1} A'^T b \quad (16)$$

显然，式(16)与式(11)的结果不完全相等，这是因为忽略阵元海拔高度差会影响入射角的计算结果。

仿真采用的4元次声阵列示意图如图5所示，阵元间距为1~3 km，最大海拔高度差为0.04 km。由于误差只与阵元位置坐标和信号入射角度有关，利用式(11)计算各方向次声信号到达各阵元的真实时延，同时是次声阵列采集到的时延。利用式(16)求解在该时延下的入射角，进而对比各方向的误差结果。可以预测，信号入射角度越接近垂直入射，阵元海拔高度差所产生的时延在总时延中所占的比例越大，忽略高度差所产生的误差也就越大。

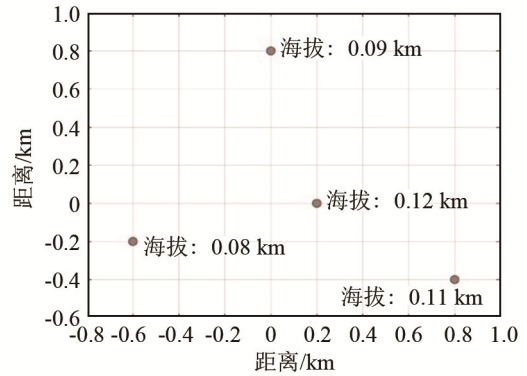
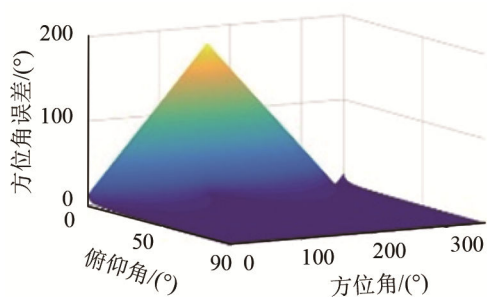
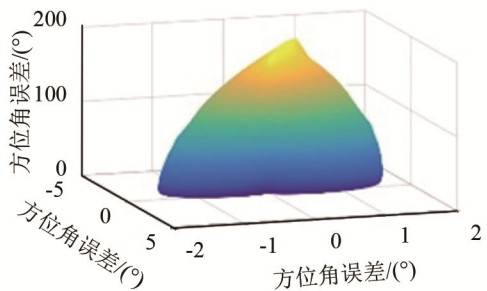


图5 仿真采用的中心一点其余三点组成三角形的4元次声阵列
Fig.5 The triangular quaternary infrasound array composed of one element at the center plus other three elements

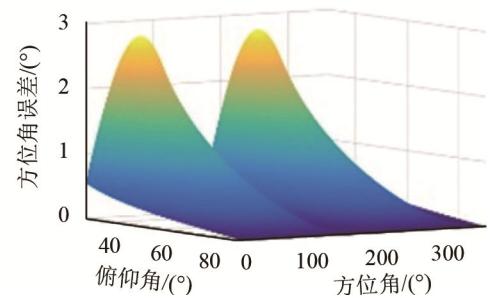
图6为取方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，步长 1.8° 的次声波入射到图5阵列，不考虑阵元高度差时产生的方位角误差。在图6(a)、6(b)中，当入射信号俯仰角接近 0° ，即信号接近垂直入射时，方位角误差极大，甚至相差 180° ，导致定位反向。随着俯仰角增加，方位角误差逐渐减小。接近水平入射的信号方位角误差范围可保证在 2° 以内。考虑到大气次声远距离传播到达阵列的俯仰角基本大于 30° ，将俯仰角取值范围改为 30° 到 90° 。图6(c)中，俯仰角为 30° ，方位角为 90° 或 270° 附近时存在误差极大值，与当前阵型构造有关。各方向方位角误差在 3° 以内。 3° 的方位角误差在次声传播水平距离500 km时，对



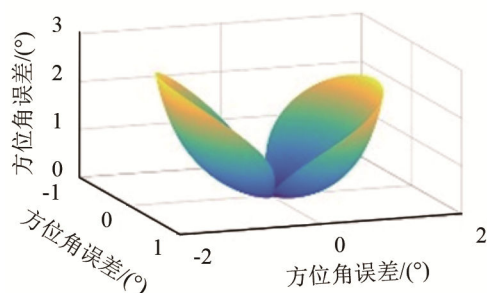
(a) 俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 直角坐标系下的方位角误差



(b) 俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 半球坐标系下的方位角误差



(c) 俯仰角 $30^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 直角坐标系下的方位角误差

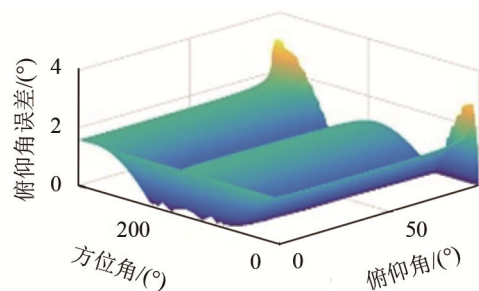


(d) 俯仰角 $30^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 半球坐标系下的方位角误差

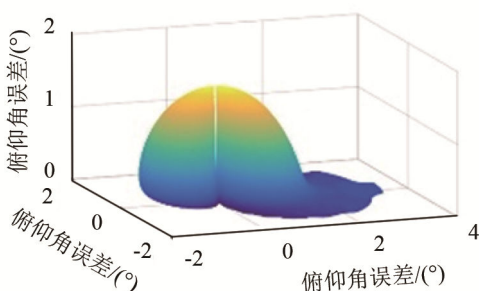
图 6 不考虑阵元高度差时次声波入射到图 5 阵列产生的方位角误差

应定位偏移误差约为 25 km, 次声传播水平距离 1 000 km 对应 50 km 的定位偏移误差。

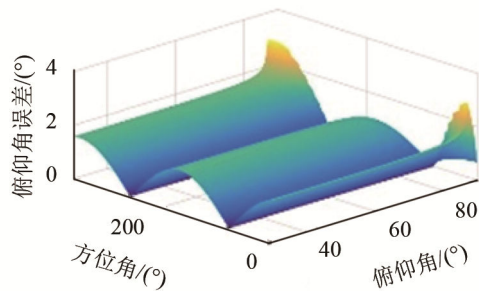
图 7 为取方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$, 步长 1.8° 的次声波入射到图 5 阵列, 不考虑阵元高度差时产生的俯仰角误差。由图 7 可见, 各方向俯仰角误差全部在 4° 以内。随着俯仰角的增加, 俯仰角误差逐渐减小。在入射信号方位角为 344° 、俯仰角为 86° 附近存在



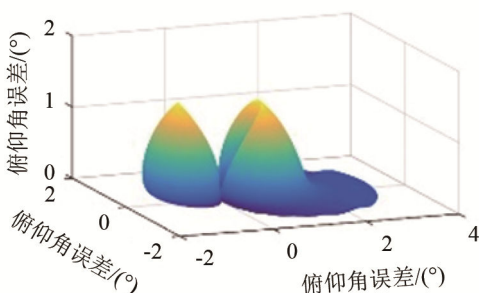
(a) 俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 直角坐标系下的俯仰角误差



(b) 俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 半球坐标系下的俯仰角误差



(c) 俯仰角 $30^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 直角坐标系下的俯仰角误差



(d) 俯仰角 $30^\circ \sim 90^\circ$, 步长 0.45° , 半球坐标系下的俯仰角误差

图 7 不考虑阵元高度差时次声波入射到图 5 阵列产生的俯仰角误差

误差极大值, 与当前阵型构造有关, 不同阵型的极大值位置和大小不同。 4° 的俯仰角误差在俯仰角为 57° 、声速为 $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 会产生 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的视速度误差。

显然, 入射角计算误差只取决于阵元海拔的相对高度差, 而非绝对高度。仍然采用图 5 中的 4 元次声阵列, 保持阵元水平位置不变, 阵元的海拔高

度服从 0 到设定最大海拔高度差值的均匀随机分布, 在经过多次仿真试验后, 可以得到对于同一入射角度的次声波, 最大海拔高度差与入射角计算误差的关系, 图 8 为方位角 30° 时平均俯仰角误差和平均方位角误差。随着阵元最大海拔高度差的增加, 入射角计算误差呈线性增大。在最大海拔高度差为 0.2 km 的情况下, 方位角误差可达到 5° 左右。对比图 8(a) 与图 8(b) 可以发现, 当俯仰角较小时, 方位角误差的增速高于俯仰角误差的增速。随着俯仰角的增加, 俯仰角误差几乎没有影响, 与图 7 相对应; 但方位角误差会急剧减小, 对应图 6。

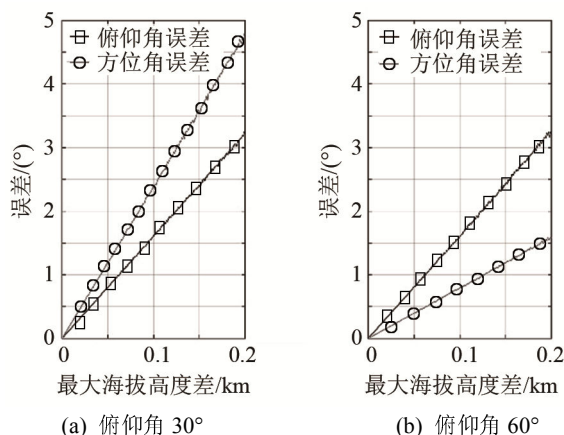


图 8 方位角为 30° 时平均俯仰角误差和平均方位角误差
Fig.8 The average pitch angle error and the average azimuth angle error with the azimuth angle of 30°

在忽略阵元海拔高度差的情况下, 入射信号俯仰角为 0° 时, 方位角误差最大, 俯仰角误差存在极大值。随着俯仰角的增加, 误差逐渐减小。次声阵列的阵型会对特定的入射方向产生误差极大值。随着阵元间最大海拔高度差的增加, 入射角计算误差呈线性增大趋势。对于仿真的 4 元中心三角阵型, 在限定入射方向与最大海拔高度差后, 计算误差均可保持在 5° 以内, 但由于次声传播距离较远, 5° 的入射角误差水平偏移距离相当于水平传播距离的 9%, 视速度误差可达到 18 m·s⁻¹ 左右。

3 结论

本文依据 PMCC 方法, 分析了基于 HB 加权的广义互相关时间延迟估计算法、信号一致性阈值检测方法和基于最小二乘法的平面波时延定位方法, 确定了忽略阵元间的海拔高度差是 PMCC 方法产生误差的主要原因。推导了在忽略阵元间高度差的情况下次声波入射角的计算方法。通过假设存在高度

差的 4 元中心三角阵型, 对各方向入射声波因忽略阵元间海拔高度差而产生的误差进行模拟与分析。同时在假设阵型水平位置不变的情况下, 讨论了最大海拔高度差与计算误差的关系。结果表明, 在次声远距离传播的条件下, 忽略阵元间的海拔高度差对后续定位误差有较大影响, PMCC 定位次声源时需要考虑阵元海拔高度差的影响。

参 考 文 献

- [1] Le PICHON A, CANSI Y. PMCC for infrasound data processing[J]. Inframatics Newsletter, 2003, 2: 1-9.
- [2] CANSI Y. An automatic seismic event processing for detection and location: the PMCC method[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(9): 1021-1024.
- [3] CANSI Y, KLINGER Y. An automated data processing method for mini-arrays[J]. CSEM/EMSC European-Mediterranean Seismological Centre Newsletter, 1997, 11(1): 1021-1024.
- [4] Le PICHON A, BLANC E, HAUCHECORNE A. Infrasound monitoring for atmospheric studies[M]. France: Springer, 2010: 29-54.
- [5] 谢金来, 谢照华. 大气核爆炸次声波远距离传播和监测[J]. 声学技术, 1997, 16(3): 99-101.
XIE Jinlai, XIE Zhaohua. Nuclear explosion infrasound long-distance propagation and monitoring[J]. Technical Acoustics, 1997, 16(3): 99-101.
- [6] 谢金来, 谢照华. 大气核爆炸次声监测系统[J]. 核电子学与探测技术, 1997, 17(6): 408-411.
XIE Jinlai, XIE Zhaohua. Infrasound monitoring system for nuclear explosions[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997, 17(6): 408-411.
- [7] KENNETT B L N, BROWN D J, SAMBRIDGE M, et al. Signal parameter estimation for sparse arrays[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(4): 1765-1772.
- [8] JONES R M, RILEY J P, GEORGES T M. A versatile three-dimensional Hamiltonian ray-tracing program for acoustic waves in the atmosphere above irregular terrain[R]. Boulder, Colorado: Wave Propagation Laboratory, 1986.
- [9] 崔玮玮. 基于麦克风阵列的声源定位与语音增强方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
CUI Weiwei. Study on methods of microphone array based sound source localization and speech Enhancement[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [10] KNAPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [11] Le PICHON A, CANSI Y. PMCC technical documentation[Z]. France: CEA/DASE Departement Analyse, Surveillance, Environnement, 2003.
- [12] 何子述, 夏威, 程婷, 等. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
HE Zishu, XIA Wei, CHENG Ting, et al. Modern digital signal processing and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [13] Le PICHON A, CANSI Y. PMCC IDC documentation[Z]. France: CEA/DASE Departement Analyse, Surveillance, Environnement, 2003.