

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.05.03

次声监测系统设计和次声传感器相位校准技术研究

张炳毅, 黄日恒, 杨军, 徐佳

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 研究建立了次声监测节点和不同孔径的次声监测阵列, 设计了消除风噪的花瓣式空间滤波器并实验验证了其降噪效果, 建立了基于互联网数据库管理的次声实时监测系统, 提出了基于改进 STA/LTA 算法的前兆次声信号提取方法和基于能量曲线与皮尔逊相关系数的前兆次声事件确认方法, 使用改进的加权时延最小方差法对监测到的次声信号进行了声源定位, 验证了定位的准确性; 研究了次声传感器的相位校准技术, 建立了试验样机, 比较了试验结果和理论结果偏差, 验证了次声相位校准的可行性。

关键词: 次声监测; 系统设计; 相位; 校准

中图分类号: TB52; TP212

文章标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)05-0009-05

Design of Infrasound Monitor System and Phase Calibration of Infrasonic Transducers

ZHANG Bingyi, HUANG Riheng, YANG Jun; XU Jia

(Changcheng Institute of Measurement & Metrology, Beijing 100095, China)

Abstract: In this article, infrasound monitor nodes and arrays in different dimensions are built. Rosette space filter for reducing wind noise is designed, and the experiment verifies the results of noise reduction. The monitor system for data management based on internet is established. The method for abnormal infrasound abstracting based on improved STA/LTA algorithm and the confirmation method based on energy curve and Pearson correlation coefficient are presented. The sound source position are estimated by modified weighting minimum delay variance method using monitor data, and the accuracy is identified by results. The phase calibration of infrasound transducer is studied, the prototype is built, the relative error between experiment and theory is compared, and the feasibility is validated.

Key words: infrasound monitor; system design; phase; calibration

0 引言

近些年来, 我国自然灾害发生比较频繁, 特别是汶川地震造成了很大的人员和财产损失, 因此对于自然灾害的监测、预警等又成为热点。研究表明地震、火山喷发、山崩前都会产生低频次声波, 次声监测成为自然灾害监测的一个重要手段。目前国内对次声监测的研究没有形成系统化的全国布局, 对影响次声定位准确性最关键的指标——次声传感器的相位一致性也缺少量值溯源支持。从 2013 年开始, 我所研究建立了次声监测节点和不同孔径的次声监测系统, 获得了丰富的次声监测数据, 并在此基础上进行了地震前超低频次声源定位研究^[1]。同时, 研究了次声传感器的

相位一致性校准技术, 为后续研究次声源定位的准确性提供重要支撑。

1 次声监测系统设计

1.1 次声监测节点设计

次声监测节点的设计是次声监测系统设计的基础, 如图 1 所示, 所设计的次声监测节点主要包括: 减小风噪的降噪管路、次声传感器、地震计、UPS、数据采集、传输系统等。

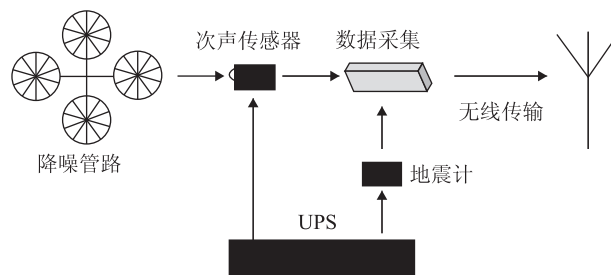


图 1 次声监测节点

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 中航工业集团创新基金资助项目(ZA7)

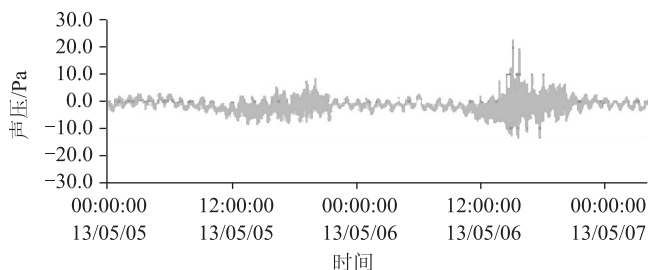
作者简介: 张炳毅(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事声学计量测试工作研究。

其中,次声传感器将次声信号转化为电信号进行传输和后续处理,采用频率测量范围可以低至 0.001 Hz 的电容次声传感器。地震计用于测量地震波,以区分地震前接收到的次声波和地震后接收到的次声波。数据采集和传输系统采用基于嵌入式系统的多通道数据采集系统,同时集成了无线传输功能,可将数据直接传送到服务器数据库端,用于后续处理,使用 GPS 要提供准确的时间同步。

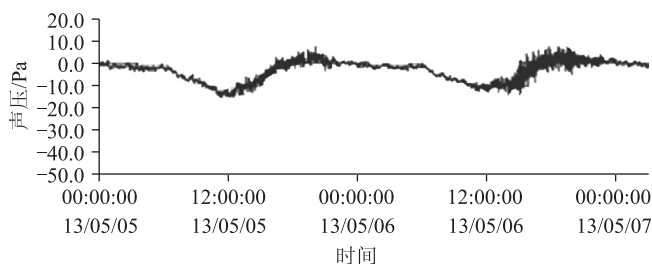
次声监测节点中,风噪对于次声信号的监测影响很大,因此需要设计相应的空间滤波器以减小风噪^[2]。风噪空间滤波器对 0.02 Hz 以上的风噪有明显的抑制作用,如图 2 所示。本研究中设计了直径 16 m 的花瓣式空间滤波器,如图 2 所示。图 3 为实际监测的不带滤波管路和带滤波管路的次声监测原始数据。根据实际测量结果,空间滤波管路可以在 0.1~10 Hz 范围内提高信噪比 5 dB 以上,在 0.5~3 Hz 范围内提高信噪比 13 dB。



图 2 花瓣式空间滤波器



(a) 无滤波实际风噪测量数据



(b) 有滤波实际风噪测量数据

图 3 实际风噪测量数据

1.2 次声监测阵列和数据管理系统设计

如图 4 所示,根据次声监测的频率范围(0.001~20 Hz),考虑到不同频率次声的空间混淆和阵列的相位分辨力,分别设计了不同孔径的次声监测阵列。



图 4 次声监测阵列和数据管理系统

在计量所内建立了孔径约为 400 m 的四元阵列,其中一个为 1.1 中所述带花瓣式空间滤波器的次声监测节点;在北京区域建立了孔径约为 20 km 的五元阵列;在全国范围内,建立了沈阳、北京、西安、成都、上海、厦门、乌鲁木齐等多元、多孔径阵列,孔径范围约为 20~2000 km。

数据管理系统采用图形界面化设计,基于互联网平台,可以远程上传数据、访问和维护。系统能够自动判别次声异常并图像化显示,同时将异常数据单独保存,用于信号识别、定位、定向等后续处理。

数据管理系统使用基于改进 STA/LTA 算法的前兆次声信号提取方法和基于能量曲线与皮尔逊相关系数的前兆次声事件确认^[3]。其原理为

$$S(n) = \frac{STA(n)}{LTA} = \frac{\sum_{i=1}^N X^2(n+i)}{\sum_{i=1}^L X^2(i)} \quad (1)$$

式中: L 为信号 X 的长度; N 为短时窗的长度; $S(n)$ 为每个时窗内信号能量占整段信号能量的百分比; $STA(n)$ 为短窗内信号能量; LTA 为整段信号的能量。

在公式(1)中, LTA 的长度改为信号 X 的长度 L ,可以避免传统 STA/LTA 方法中 LTA 不断改变导致 $S(n)$ 对小幅值信号敏感的问题。通过改进后的 STA/LTA 方法对次声信号处理的效果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,改进后的 STA/LTA 方法对小幅值的信号的确不如传统 STA/LTA 方法敏感,与原始信号对比来看,通过改进后的 STA/LTA 方法得到的结果可以很好的描绘原始信号的能量变化情况。

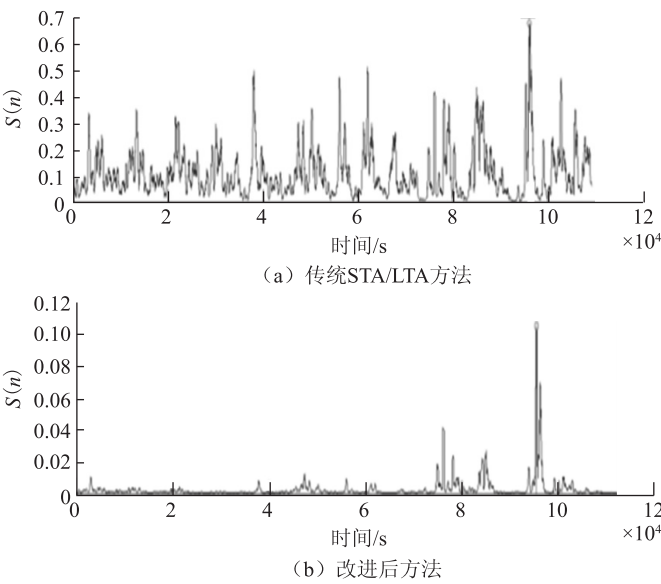


图5 传统 STA/LTA 方法和改进后方法的效果对比

1.3 监测数据和定位研究

监测系统经过近年的连续运行，获得了丰富的次声监测数据，图 6 为日常监测数据（2013.4.14 ~ 2013.4.20），图 7 为雅安地震（2013.04.20，7.0 级）前兆异常次声，图 8 为天津爆炸（2015.8.12）次声波，图 9 为地震同震次声波。

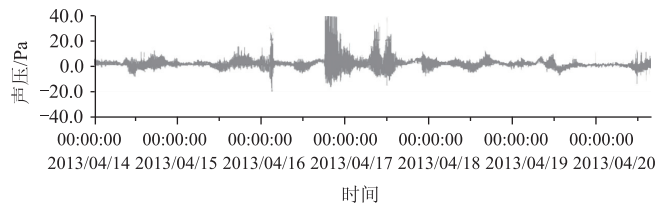


图6 日常监测数据

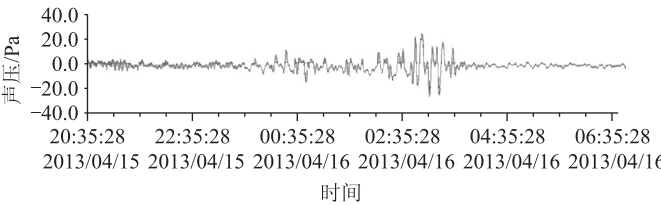


图7 雅安地震(2013.04.20，7.0级)前兆异常次声

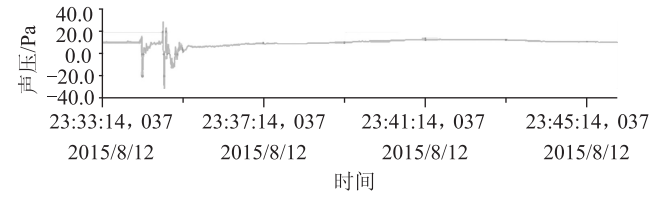


图8 天津爆炸(2015.8.12)次声波

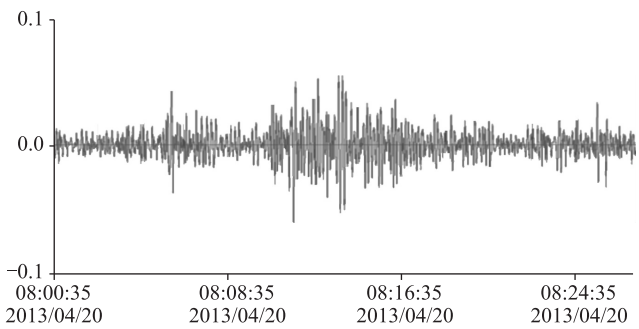


图9 雅安地震北京本地同震次声

研究中，提出了用于次声源定位的加权时延最小方差法。其主要思路是在时延最小方差法的基础上，突出近距离台站间时延及信号相关性好的次声台站间时延对声源定位结果的影响^[4]。

与时延最小方差法相同，首先假设次声波的传播速度为 v ，对于声源的空间坐标 (x, y) 位置，共有 m 个次声监测台站的阵列， (x_i, y_i) 为第 i 个声源的空间坐标， $i = 1, 2, \dots, m$ ，则可以计算出次声波到达每个次声监测台站的时间 t_i 为

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{v} \tag{2}$$

计算加权时延估计方差 E 为

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [t_{ij} - (t_i - t_j)]^2 \cdot Q_{i,j}} \tag{3}$$

式中： t_i, t_j 为声波达到第 i, j 台站的时间； t_{ij} 为长期监测的声波到达 i, j 两台站的时间差值； $Q_{i,j}$ 为权值，用来突出 i, j 两台站间时延对声源定位结果的影响，理论上可以根据各台站长期监测数据间的相关性或定位偏差对权值进行修正。

通过使用公式(2)和公式(3)算法对雅安地震、天津爆炸等进行了次声源定位，如图 10 和图 11 所示。以天津爆炸(2015.8.12)为例，时延方差最小点为东经 117.7° ，北纬 39.0° ，在天津滨海新区内，与实际爆炸地点相近。

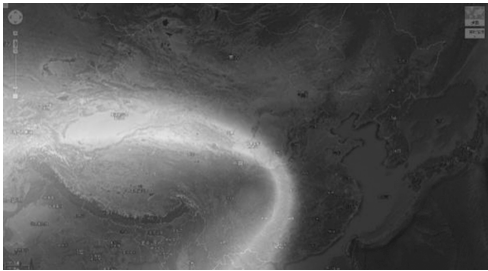


图10 雅安地震次声波定位

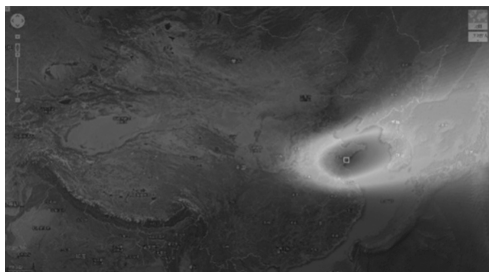


图 11 天津爆炸次声波定位

2 次声传感器相位校准技术研究

2.1 次声传感器校准现状

目前,国内外使用最多的次声传感器主要包括绝压式的 MB2000 系列和差动电容式次声传感器。对于 MB2000 系列绝压传感器的校准可以通过静态压力校准溯源到压力量,对于差动式的次声传感器,其低频声学特性对环境因素敏感,缺乏适用的精确校准技术。

国内对电容式次声传感器的校准可以通过耦合腔互易法或者激光活塞发生器法进行。耦合腔互易法最低频率可以达到 2 Hz,不确定度 0.2 dB,激光活塞发生器法最低频率可以达到 0.1 Hz,不确定度为 0.8 dB^[5]。中科院曾研制可以用于次声传感器校准的波纹管式声压发生器,最低频率约为 0.0012 Hz,但是没有给出不确定度^[6]。国外研制的用于校准 MB2000 系列次声传感器动态特性的校准装置,下限可达 0.025 Hz^[7]。宾夕法尼亚大学研制的次声校准装置频率范围为 0.001~30 Hz^[8]。但是在低至 0.001 Hz 的频率时,压力波动不再绝热为等温过程,而且还可能存在过渡态,因此给校准带来困难^[9]。

由于差动式次声传感器的频响主要取决于传感器物理结构和电路的保持性能,如膜片刚度、均压管直径、长度、保持器性能等。由于次声传感器工艺和电路的设计,不同传感器之间会有相位差。

声源定位主要根据声信号的空间分布和到达不同传感器的时间差,因此传感器本身的相频特性影响最终的定位结果。然而,国内声传感器的校准对相位没有具体的要求;次声传感器不仅没有进行相位校准,而且缺少相应的校准手段。

2.2 次声传感器相位差校准和不确定度来源分析

中航工业计量所研究了次声传感器的相位校准技术并对其相位校准的不确定度分析,其原理如图 12 所示。

校准源为一超低频活塞声源,在一个密闭的腔体

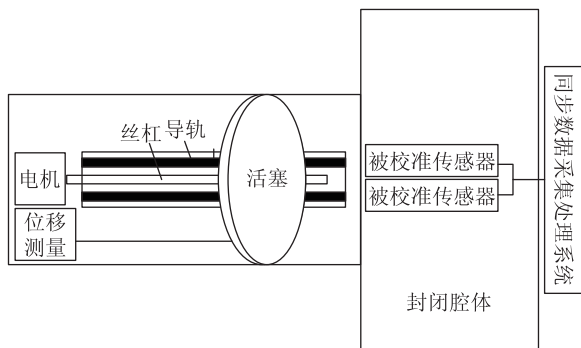


图 12 次声传感器的相位校准原理

内(尺寸远小于 $1/10$ 波长),通过电机和丝杠带动活塞做往复运动,产生一个频率、声压稳定的正弦次声信号,通过位移传感器测量机构实时测量活塞的位移,在封闭空间内并列放置需要校准的两个次声传感器,同步测量两个传感器的输出,通过采集到信号的时间差获得两个次声传感器的相位差,通过更换两个次声传感器的安装位置,补偿声压空间分布的不均。

相位校准不确定度的主要来源包括:等温过程和热传导引入的不确定度、波形失真引入的不确定度、声源的空间分布均匀性引入的不确定度、数据采集系统同步性引入的不确定度、校准结果的分散性引入的不确定度等。

2.3 校准结果

通过实验,在 0.001~2 Hz 分别比较了 BK4193 型次声传声器(-3 dB 下限频率为 0.028 Hz)和中科院声学所 CASI 型电容次声传感器(-3 dB 下限频率为 0.003 Hz)的相位差,如图 13 所示。试验结果验证了校准系统的可行性。从试验结果可以看出,相位校准结果和理论相位差基本一致,其中的差异在 0.5 Hz 及以下较大,主要原因是 0.5 Hz 以下环境温度的影响增大。

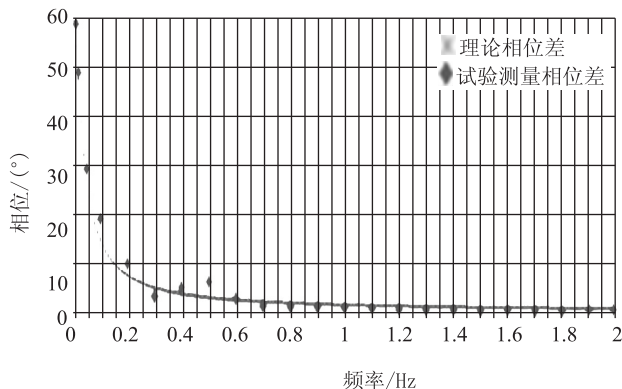


图 13 不同次声传感器相位差比较

3 结论和展望

本研究所研制的次声监测系统,实现了在全国广域范围内的 0.001~20 Hz 的次声信号进行监测。设计的监测阵列可以对爆炸、雷电、地震前后产生的次声信号进行不间断采集和无线传输,通过服务器端数据管理和分类,可以对次声信号特征进行提取用于后续次声源定位等分析处理。

本研究通过使用基于改进 STA/LTA 算法的前兆次声信号提取方法和基于能量曲线与皮尔逊相关系数的前兆次声事件确认,实现了异常次声信号的自动识别。通过引入站点间相关系数修正的加权时延最小方差算法,实现了地震前次声源的定位。

目前爆炸次声信号的监测和定位技术已趋于完善,通过天津开发区爆炸信号分析和定位结果显示,本监测系统已经完全可以使用阵列技术对爆炸点进行较准确的估计。美国军方在白沙导弹基地周边已经设计了次声监测阵列,如图 14 所示,用于武器的发射产生的高层大气次声的传播等研究^[9]。本研究建立的次声监测系统经过进一步的发展也可用于爆炸、武器探测等领域。

本研究还对次声传感器相位校准进行了原理性验证,有待于进一步开展对低至 0.001 Hz 的次声传感器相位绝对校准标准的研建以及不确定度的具体评定。

参 考 文 献

[1] Riheng Huang, Li Zhang, Jun Yang, et al. Atmospheric Infrasound Monitoring and Analyzing of the Infrasound Events Before the 2015 Nepal Earthquake [C]//International Conference on Material, 2015.

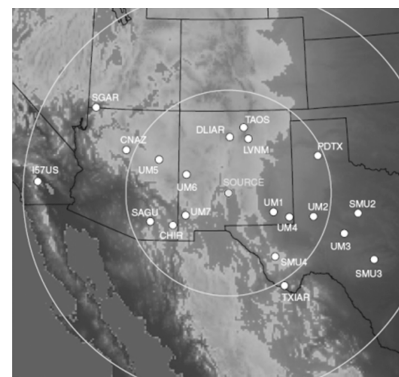


图 14 白沙导弹基地周边设计的次声监测阵列

[2] Benoit Alcoverro, Alexis Le Pichon. Design and optimization of a noise reduction system for infrasonic measurements using elements with low acoustic impedance[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(1): 1717-27.

[3] 黄日恒. 超低频次声波定向定位方法研究[D]. 北京: 北京长城计量测试技术研究所, 2016, 35-40.

[4] 黄日恒. 超低频次声波定向定位方法研究[D]. 北京: 北京长城计量测试技术研究所, 2016, 46-48.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 2037-2015 空气声声压计量器具[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[6] 张炳毅, 曾吾. 传声器校准用活塞发生器的研究进展[J]. 计测技术, 2007, 27(5): 5-7.

[7] Benoit Alcoverro, Device for calibrating a pressure sensor in particular an infrasound pressure sensor[P]. USA, US20050257598, 2002.

[8] Timothy Marston, Thomas Gabrielson. Infrasonic pistonphone calibration of acoustic transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(5): 3378.

[9] Alexis Le P, Elisabeth B, Alain H. Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies[M]. USA. Springer, 2009.

福祿克便携式红外热像仪用于供热管线检测

供热管线一般铺设在地下,受地面沉降和热胀冷缩的因素影响,管道可能会发生破损导致热水流失,直接影响到供热效果,并且造成大量的能源浪费,

近年来,由于供热管网破损、漏水导致供热效果降低甚至中断供热的事件日益增多,其原因主要有:管网老化、地面沉降、车辆超载重压、周边施工等。一般主供热管线的热水温度在 140℃,若发生供热管网损坏,通常至少造成数千乃至数万吨热水的损失,同

时还会影响到周边大片居民区的供热,特别在北方冬天,供热管网的损坏将会严重影响居民的正常生活。

福祿克便携式红外热像仪在供热管线破损检测中的应用,为保障供热提供新的检测手段。便携式红外热像仪可对泄漏点进行区域扫描,准确、快速地对地下泄漏部位进行定位,方便维修、减少能源损耗、确保冬季正常供暖。

(刘倩倩)