

北京地区山背波监测与特征分析

郭 泉^{1,2}, 吕 君¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用北京西北地区布置的小孔径大气次声传感器网络, 利用有效来波判断方法搜寻有效来波, 并使用最小方差空间搜索方法定位波源, 分析经常发生并对正常观测造成干扰的一种次声波—山背波信号的特征规律: 幅度、频谱、波源位置、波速、来波方向及发生时间统计规律。对 2013 年 4~5 月的次声波记录数据进行分析, 结果显示: 低于 0.02 Hz 频段, 各传感器经常性接收到来自于西北山区方位的次声波, 幅度一般在 10~20 Pa, 中心频率处于 0.002~0.005 Hz, 最小方差法定位结果显示信号源大多自北京西山的面向阵列的一侧, 方位角统计结果显示大多数在 260°~360°、0°~40°, 且传播速度为 10~50 m/s, 该波的发生与当地的风速风向具有相关性。

关键词: 小孔径阵列; 山背波; 定位; 统计特征

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0247-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.012

Detection and characteristic analysis of mountain wave occurred around Beijing area by using infrasound microphone array

GUO Quan^{1,2}, LÜ Jun¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The characteristics of mountain wave occurred in the Western hill of Beijing by using small aperture infrasound array, including amplitude, spectrum, azimuth of arrival wave, wave source location and statistical law, are studied in this paper, also the problems about the detection threshold and the least squares localization of the mountain wave are considered. The infrasound recordings over two month from 2013/04 to 05 are analyzed, and the result shows that the low frequency infrasonic wave from northwest mountain area is usually detected by the array, whose amplitude is 10~20 Pa and centre frequency is 0.002-0.005 Hz. The wave is mostly from hillside face to the array, and the azimuths of arrival wave are nearly 260-360 and 0-40 degrees respectively, moreover, the wave velocity is 10~50m/s and the occurrence of this wave is correlated with local wind speed and direction.

Key words: small aperture array; mountain wave; localization; statistical characteristic

0 引言

2013 年 4 月在北京西北部建立次声传感器三点阵并监测远距离大气次声源, 该次声三点阵距离北京西山不到 20 km, 经常性监测到一系列频率低于 0.02 Hz 的具有较强相关性(相关系数大于 0.9)的次声波信号, 该信号幅度一般小于 30 Pa。由于该低频次声波经常出现, 将会影响远距离次声源观测以及次声波提取识别, 同时降低次声源定位精度, 特别是海啸次声波, 其频率在 0.006~0.02 Hz^[1], 台风的次声波也接近该频段^[2], 文献[3]发现在山地区域经常会出现类似频率的次声波, 认为该波主要为山

背波。当气流遇到次声阵列周边的山脉, 在迎风面顺着山势上升越过山脊, 重力作用下在背风一侧气流回到原先的水平面, 然后气流由于惯性再次上升, 从而形成山背波。山背波不但会对阵列远距离波源探测造成影响^[4], 大幅度山背波引起的大气波动还会对飞机飞行安全造成影响, 因此研究其特征具有一定意义。

1 阵列及信号处理方法

1.1 传感器阵列设备组成

次声波监测数据来自于北京的次声传感器阵列(图 1(a)), 距离北部山区大约 20 km, 距离西部和南部山区小于 10 km。该阵列共有 3 个台站(图 1(b)), 台站之间的距离分别为 281、387、516 m。每个台站包含 INSAS2010 型次声传感器和数字采集仪,

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-06-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11074278、11174320)

作者简介: 郭泉(1984—), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 研究方向为自然事件大气次声源监测与定位。

通讯作者: 郭泉, E-mail: guoquan@mail.ioa.ac.cn

传感器的 3 dB 频带测量范围为 0.008~40 Hz, 满足对山背波频率的测量需求。配套的数字采集仪能够将 AD 转换后信号通过广域网传输到 FTP 服务器^[5]。其中 1 号传感器使用了梅花瓣型防风管道, 用于减弱风噪声对信号观测的影响^[6]。

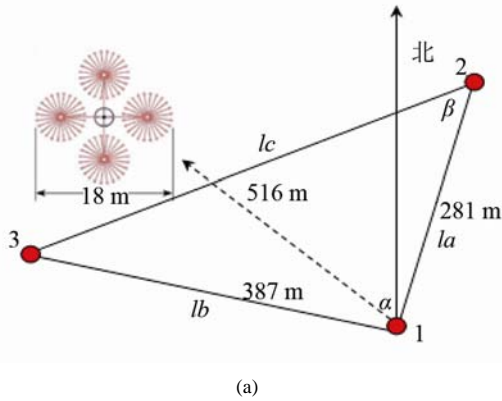


图 1 阵列各传感器(1,2,3)相对位置(a)以及地理位置(b)
Fig.1 Distribution of sensors (a) and their locations (b)

1.2 有效目标信号识别及定位方法

三点阵传感器之间的信号时延满足公式(1), 传感器之间时延为 $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{23}$ 、 $\Delta\tau_{31}$, 它们的闭环和等于零, 但实际情况下该闭环时延和只能趋向于零。对于一段时间内信号, 满足如下关系^[7]:

$$r_{123} = \Delta\tau_{12} + \Delta\tau_{23} + \Delta\tau_{31} < \varepsilon \quad (1)$$

公式(1)可以作为判断该段时间内信号是否到达的依据, 能够避免次声三点阵附近接收到的随机信号产生的干扰, 而且 $\Delta\tau_{12} \approx \Delta\tau_{23} \approx \Delta\tau_{31} < \varepsilon$ 。

当使用上述方法判断得到有效信号到达时, 可使用公式(1)计算得到三点阵来波方位角计算公式(2)和波速公式(3):

$$\phi = \arctan \frac{(\tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{23}) / \tau_{12} - (la + lb \cos \alpha + lc \cos (180^\circ - \beta)) / la}{(lb \sin \alpha + lc \sin (180^\circ - \beta)) / la} \quad (2)$$

$$v = \frac{la \cos \phi}{\tau_{12}} \quad (3)$$

上式中, la 、 lb 、 lc 、 α 、 β 已在图 1 中标注。使用最小方差法对阵列的周边区域进行扫描, 确定每组有效信号的波源位置。首先计算出次声波到达每个传感器的时间。

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{v}, \quad i=1,2,3 \quad (4)$$

进一步计算时延估计方差:

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [\hat{t}_{ij} - (t_i - t_j)]^2} \quad (5)$$

对全空间扫描可以得到最小方差 $\sigma(x_0, y_0)$ 对应的坐标 (x_0, y_0) , 即为声源坐标的估计值。

2 观测结果及分析

2.1 典型山背波信号分析及波源定位

在 4 月 27 日 3 时~28 日 3 时这段时间山背波信号幅度较大, 因此作为典型信号进行观察和分析。图 2 为该段时间的信号波形图和频谱图, 能够发现大多数信号的幅度在 5~20 Pa, 频谱图显示信号频率分布在 0.01 Hz 以下的频段, 中心频率是 0.002~0.005 Hz。

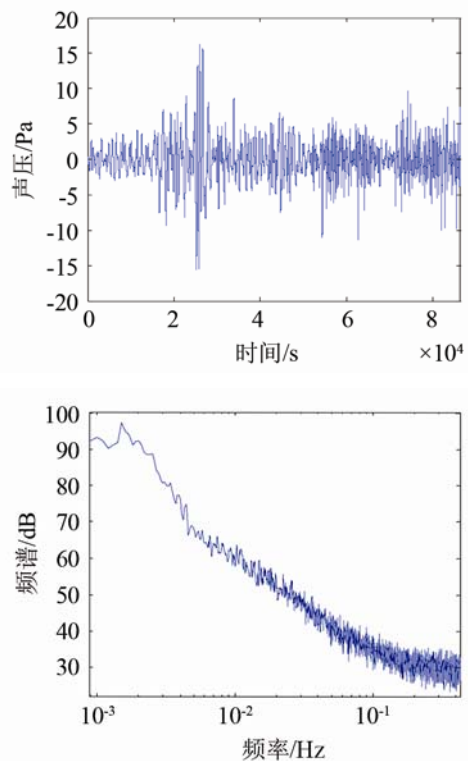


图 2 4 月 27~28 日信号波形及频谱
Fig.2 Waveform and spectrum of the signal on 27~28 April

为了有效利用次声数据以获得准确的波源方位角速度, 将每路信号(长度为 N)首先进行低通滤

波($f_s=0.02\text{ Hz}$), 设定样本信号长度为 $L=2000\text{ s}$, 以保证取得 4 个周期以上的信号, 信号重叠率为 50%, 得到样本信号个数是: $(N-L)/0.5L+1$ 。

通过互相关方法计算信号时延得到 $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{23}$ 、 $\Delta\tau_{31}$, 设 $\varepsilon=1$, 再通过公式(1)判定样本信号是否为有效来波信号, 根据公式(2)、(3)计算所有有效样本信号的方位角(正北为 0° , 顺时针方向)和波速, 设次声阵位置为原点, 使用公式(4)、(5)搜索西北 50 km 的区域, 即可得到波源的坐标, 如表 1 所示。表 1 中显示了 4 月 27~28 日内共有 22 组有效来波信号的时延、波速和声源坐标信息, 将声源坐标显示在图 3 中。

图 3 是以阵列为中心, 东西长 50 km, 南北长

表 1 4 月 27~28 日各有效来波时延与坐标参数
Table 1 Time-delays and coordinates of arrival waves on 27~28 April

序号	t_{12}	t_{23}	t_{31}	波速/(m/s)	声源坐标(x,y)/km	
1	6	0	-6	38.43	-14	39
2	4	0	-4	57.64	-14	39
3	5	1	-7	41.36	-20	41
4	3	8	-12	32.39	-46	39
5	0	6	-6	67.34	-18	7
6	7	0	-7	32.94	-14	39
7	13	9	-23	13.63	-32	49
8	12	6	-17	16.27	-12	29
9	16	5	-21	12.87	-24	47
10	14	1	-16	15.85	-20	49
11	6	9	-15	22.96	-10	11
12	7	14	-22	16.74	-28	27
13	11	10	-21	15.14	-24	33
14	16	0	-17	14.25	-16	43
15	15	0	-15	15.37	-14	39
16	11	18	-29	12.03	-18	19
17	15	14	-30	10.89	-32	43
18	15	0	-16	15.19	-16	43
19	12	0	-13	18.93	-8	21
20	13	15	-27	11.96	-16	43
21	10	13	-24	14.43	-42	49
22	13	7	-21	14.39	-26	43

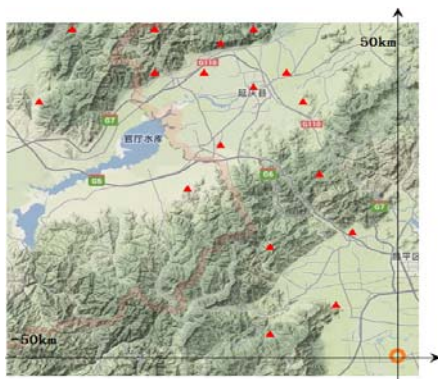


图 3 4 月 27~28 日 基于最小方差法有效来波源定位示意图
Fig.3 Locations of mountain wave sources on 27~28 April by the method of least square

50 km, 4 月 27~28 日的有效来波的声源来自阵列西北部的山区, 主要位于面向传感器的山坡, 少数声源来自两个山脉之间的地区。

2.2 2013 年 4~5 月山背波特征统计分析

2.1 节分析了短时间的典型山背波信号的特征和波源位置, 但是还需要对长时间的信号的特征规律进行统计, 以获得更具代表性的结果。因此对 2013 年 4~5 月的连续 2 个月次声阵的 3 路信号, 使用 2.1 节中的处理方法, 计算有效来波的方位角、相关系数和波速, 并进行统计分析, 以获得长时间的特征统计规律。图 4 为计算获得信号的信号时间-方位角-波速计算结果, 在 2 个月的次声波记录中, 大多数时间内都能够接收到 0.02 Hz 以下的有效来波, 而且波速主要 100 m/s 以下, 而且形成了 4 个时间段的主要波群(红色方框): 4 月 6~18 日, 4 月 26~28 日, 5 月 12~14 日, 5 月 18~26 日。3 路有效来波信号的相关系数大多在 0.9 以上, 显示这些信号并不是单个传感器受到干扰产生的。

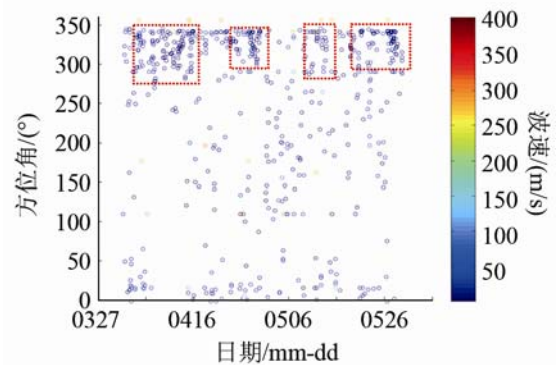
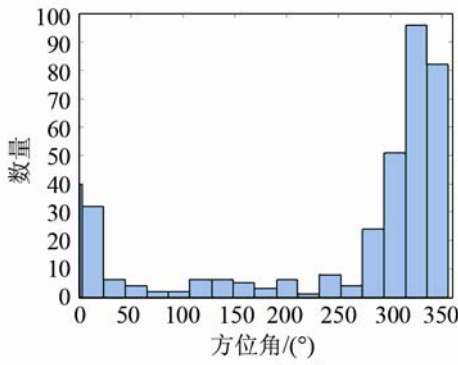


图 4 2013 年 4~5 月次声波时间-方位角-速度
Fig.4 Times-azimuths-velocities of arrival waves in April and May, 2013

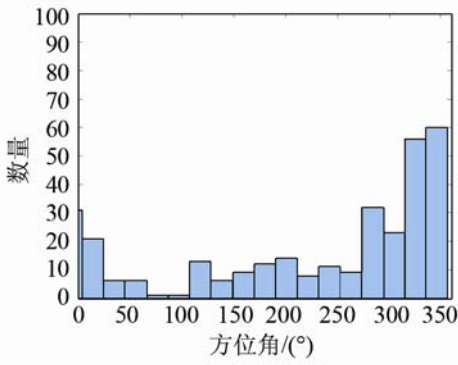
图 5 中为计算获得信号方位角的统计直方图, 超过 90% 的信号来波方位角主要在 $0^\circ\sim40^\circ$, $260^\circ\sim360^\circ$ 范围内, 而很少分布在其他方向, 其中 4 月份在 $0^\circ\sim40^\circ$ 、 $260^\circ\sim360^\circ$ 范围内的有效来波次数多于 5 月份, 而 5 月份在其他方位角范围($120^\circ\sim260^\circ$)内的有效来波次数也多于 4 月份。根据速度统计计算(图 6), 在 $0^\circ\sim50^\circ$ 、 $260^\circ\sim360^\circ$ 范围的有占总次数 93% 的有效来波的速度小于 50 m/s。

2.3 计算与统计特征分析

对 2013 年 4~5 月的阵列信号进行信号特征统计分析显示, 山背波主要分布在阵列方位角 $0^\circ\sim40^\circ$ 、 $260^\circ\sim360^\circ$ 的范围, 传感器阵列周边主要的山脉都分布在该方位角范围, 根据 2.1 节的典型信号定位结果, 波源来自于阵列西北方 20~40 km 的山脉区域, 不是来自于其他更远的位置, 因此能够



(a) 2013年4月



(b) 2013年5月

图5 2013年4-5月次声波有效来波信号方位角统计直方图
Fig.5 Histogram of azimuths of arrival waves in April and May, 2013

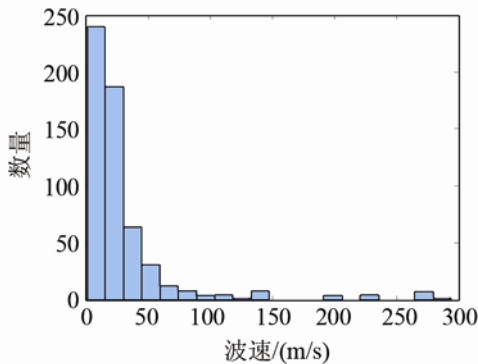


图6 2013年4-5月方位角0°~50°、260°~360°的有效来波波速统计直方图
Fig.6 Histogram of azimuths of arrival waves (0°~50°、260°~360°) in April and May, 2013

说明该山背波的波源是北京西山,大多数有效来波的波速小于50 m/s,因此从波速和波源位置验证了该波是由于山地地形而产生的山背波,不是远距离次声源产生的。

山背波的随时间的发生规律如图5所示,4月份从西北部山脉方向来波次数多于其他几个月,而其他几个月则在东南和西南方向(100°~200°)略高于4月份。因此对北京市4~5月份风力风向进行对比,如图7所示,该图记录了2个月期间每天的最高风力和主要风向情况,2013年4月份风向主要为偏北风,因此阵列北方山脉出现山背波的次数要

高于5月,而5月的北风减少而偏南风的次数逐渐增多,因此阵列西南方的山脉出现山背波的次数要高于4月份,并且风向有利于来自南方次声波的大气传播,另外从图7与图4的对比显示出风力风向与接收到的有效来波的次数呈现较好的对应关系:如图5中红色虚线方框所示,4月6~18日,4月26~28日,5月12~14日,5月18~20日有持续较强的北风和连续的来自西北方向有效来波信号。

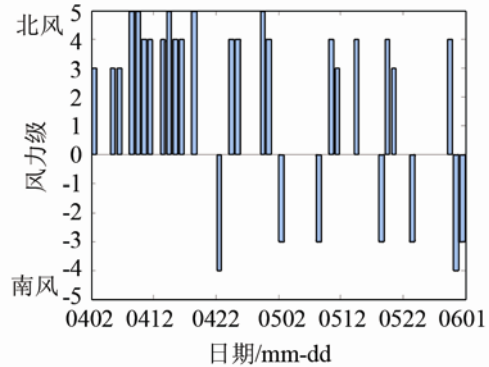


图7 北京市4~5月风力风向示意图
Fig.7 States of wind over April and May, 2013 in Beijing

3 结 论

本文利用安装在北京西北部山区的次声传感器三点阵,对大气次声波进行2个月的观测。对该段时间内的次声信号特征进行统计和分析:阵列周边的山脉产生的山背波幅度大多在5~20 Pa,中心频率为0.002~0.005 Hz,波速小于50 m/s,最小方差法定位结果显示主要来自于方位角0°~40°、260°~360°的范围的北京西北方向的山区,来自于山脉面向传感器的一侧和两个山脉之间的平原。由于4~5月份跨越春夏两季,4月与5月的主要风向的变化,使得不同时间内山背波来波方位角分布也随之变化,风力较强的时间段,山背波出现的次数也较多。该阵列观察到较多山背波的主要原因是布置在三面环山的位置,很多时间都能接收到山背波,因此在日常大气次声波监测中,根据山背波的特征,剔除山背波的影响,能够找到远距离次声源的信号,另一方面通过次声阵列监测山背波,能够及时发现其发生时间和位置,为其可能产生的不利影响提供监测依据。

参 考 文 献

[1] 杨亦春,郭泉.中科院声学所在次声学研究方面取得重大进展[J].声学学报,2011,36(3):307.
 YANG Yichun, GUO Quan, The great progress of Institute Acoustic, Chinese Academy of Sciences on infrasound study[J].

- Acta Acustica(in Chinese) 2011, **36**(3): 307.
- [2] 肖赛冠, 张东和, 肖佐. 台风激发的声重力波的可探测性研究[J]. 空间科学学报, 2007, **27**(1): 35-40.
XIAO Saiguan, ZHANG Donghe, XIAO Zuo, Study on the detectability of typhoon-generated acoustic-gravity waves[J]. Chinese Journal of Space Science(in Chinese), 2007, **27**(1): 35-40.
- [3] 桑建国, 李启泰. 小尺度地形引起的切变重力波[J]. 气象学报, 1992(2): 227-31.
SANG Jianguo, LI Qitai, Shear-gravity wave caused by small scale terrain[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992(2): 227-31.
- [4] 杨训仁. 山背波: 对飞机的潜在威胁[J]. 应用声学, 1995, **24**(4): 28-33.
YANG Xunren. Mountain lee waves as latent menace to aircraft, Applied Acoustics, 1995, **24**(4): 28-33.
- [5] 郭泉, 杨亦春. 基于广域次声传感器网络的地震本地次声波研究[J]. 地球科学, 2014, **39**(12): 1807-1817.
GUO Quan, YANG Yichun. Observation and studying of local infrasound coupled by seismic wave on wide spread infrasound network[J]. Earth Science, 2014, **39**(12): 1807-1817.
- [6] CHRISTIE D, CAMPUS P. The IMS infrasound network: design and establishment of infrasound stations[M]// Pichon A L, Blanc E, Hauchecorne A. Infrasound monitoring for atmospheric studies. Springer. 2009: 29-75.
- [7] CANSI Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method[J]. Geophysical research letters, 1995, **22**(9): 1021-1024.



The 1st IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium (COA 2016), sponsored by the IEEE Oceanic Engineering Society, will be held by Harbin Engineering University (HEU) and Université Libre de Bruxelles (ULB) in Harbin from 9th to 11th January, 2016. This unique event will create an exchange platform for universities, research institutions and industries worldwide in one of the key fields of ocean science and engineering. You will be access to the key lectures on fundamentals by widely-recognized researches, an exhibition of the advanced technologies, instruments, equipments of underwater acoustics and applications.

Please visit the COA 2016 website <http://www.chinaoceanacoustics.org> to find the Call for Papers for the Symposium, instructions for pre-registration and abstract submission.

We are hoping that the Symposium is of interest to you to contribute a paper in the researches and applications of ocean acoustics. Participants will receive the proceedings collecting all contributions and IEEE Xplore will publish the papers.

Secretariat: ZHAO Yan, Harbin Engineering University

Tel: +86 451 82518267 | +86 451 82588267

E-mail: info@chinaoceanacoustics.org



哈尔滨工程大学和比利时自由大学联合主办的第一届 IEEE/OES 中国海洋声学研讨会(COA 2016)将于 2016 年 1 月 9~11 日在中国哈尔滨召开, 会议将为国内外高等院校、研发机构、工业界提供一个海洋声学领域研究及成果的国际交流平台。

会议详情请登录网站 <http://www.chinaoceanacoustics.org> 获得, 欢迎在线投稿和注册。

大会秘书: 赵妍 Tel: +86 451 82518267, +86 451 82588267

联系电话: 13313672008

会议邮箱: info@chinaoceanacoustics.org