

文章编号: 2095-4980(2018)03-0501-09

浅水区水下爆炸直达声辨识与时频分析

刘磊^{1,2}, 郭锐^{*1}, 刘荣忠¹

(1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.埃因霍温理工大学 机械工程系, 埃因霍温 5600MB 荷兰)

摘要: 为有效截取直达声分量以分析真实的水下爆炸声源特性, 提出一种利用局部相关峰进行直达信号辨识的标记算法, 并建立起算法结果的评价函数, 然后结合浅水区水下爆炸实验, 对比射线理论计算所得直达声分量的数目, 初步验证了算法合理性, 最后对所捕获的最优直达声片段(宽度约 1.8 ms)进行希尔伯特-黄变换(HHT), 分析频谱特性。结果表明: 直达声压级时间序列具有良好的自相关性, 且在近程条件下, 其相对排列特征能近似保持稳定; 该算法可以获得较高的局部相关峰, 使得直达声片段能够被清晰地标记出来, 尤其是在超近程条件下, 相关峰可达 0.9 以上; 爆炸声源的主频带稳定在 0~10 kHz, 且峰值频率约 1 kHz, 但是当传播距离较远时, 其形状会明显受到声速剖面影响。

关键词: 水下爆炸; 直达声; 时间序列; 相关函数; 希尔伯特-黄变换; 频谱

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0501

Identification and time-frequency analysis of direct components from the underwater explosion in the shallow water

LIU Lei^{1,2}, GUO Rui^{*1}, LIU Rongzhong¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;
(2.Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 5600MB, Netherlands)

Abstract: For obtaining direct sound component effectively to analyze real characteristics of the underwater explosion source, a marking algorithm is proposed, which utilizes the local correlation peak to identify the direct sound. The evaluation function for the algorithm result is established. Based on underwater explosion experiments in the shallow water, the reasonability of this algorithm is initially verified by comparing with results through the ray theory, and further the frequency spectrum analysis is performed on the optimal direct sound interval(width about 1.8 ms) acquired by this algorithm through Hilbert-Huang Transform(HHT). The results indicate that: the sequence of the direct sound pressure level has a high autocorrelation and the corresponding relative array feature can keep stable approximately in the short range; this algorithm can bring good local correlation peaks and identify the direct sound components clearly, especially in the very short propagation range, with the correlation peaks even over 0.9; the main frequency band of the used explosion source is stable around 0-10 kHz, with the peak frequency of 1 kHz approximately, but when the propagation range is relatively longer, the corresponding spectrum profile will be influenced by the sound speed distribution significantly.

Keywords: underwater explosion; direct sound; time sequence; correlation function; Hilbert-Huang Transform; frequency spectrum

水声技术被广泛用于水下探索、定位、通信和生态观测等方面^[1-3]。大量实验表明, 几公斤 TNT 水下爆炸引起的强声波能够传播数百千米之远, 因此爆炸能够被用作一种有效的强水声源^[4-6], 但复杂的爆炸源化学特性、界面效应和介质影响, 使得水下爆炸声混杂着大量噪声以及来自不同传播路径的分量, 因此通常情况下, 难以直

收稿日期: 2016-12-14; 修回日期: 2017-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11102088); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20133219110019)

*通信作者: 郭锐 email:guorui@njust.edu.cn

接对真实的爆炸声源特性进行分析评估。

爆炸声信号不易模拟,因此基于测量数据进行时频分析成为研究水下爆炸声特性的主要手段。通过大量的频谱分析,Weston^[7]指出不同含能材料与药量条件下的爆炸声信号谱具有相似性,从而可利用归一化的谱进行描述。潘正伟等^[8]通过观察水下爆炸实验,指出爆炸声具有很宽的频带。吴成等^[9]着重分析了超近程范围内的水下爆炸声,发现高频与低频部分分别对应冲击波频谱与二次气泡脉动频谱,且存在相干效应。贾虎等^[10]分析了纤维导爆索引起的近场爆炸声特性,指出主频带宽达 0~40 kHz,但主要能量集中在低于 5 kHz 的部分。此外,张志华等^[11]对两装药条件下的爆炸声特性进行了研究,发现前爆和后爆冲击波均具有宽频带,且主要作用在 780 Hz 以上,峰值位置在 293 Hz 附近,但后爆冲击波能量大于前爆冲击波能量。

近年来,相比于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)与小波包变换(Wavelet Packet Transform, WPT)等,希尔伯特-黄变换(HHT)逐渐成为非线性与非平稳信号频率分析的主要方法,并得到广泛应用与改进。Huang^[12]最早提出并对其应用特性进行了总结。Veltcheva 等^[13]利用 HHT 成功解析出葡萄牙近海的非平稳波浪谱,而 Datig 等^[14]利用三角函数法对 HHT 过程中的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)进行了参数研究,进一步指出所得 Hilbert 谱的瞬时频率和瞬时幅值与海浪水位息息相关。结合大量振动信号分析案例, PENG 等^[15]指出了 HHT 的 3 个主要缺陷,并通过引入 WPT 前处理过程改善了 HHT 的分解效果。通过将 FFT 引入到 HHT 的模态分解过程, Murugan 等^[16]改善了含有风噪声的水声信号分析效果,使得参考信号能更有效地从环境噪声中分离开。此外,程等^[17]通过将小波分解和相关系数筛选法相结合,优化了内蕴模态(Intrinsic Mode Functions, IMF)的获取过程,有效消除了错误的 IMF 分量,但计算代价大。

研究人员对水下爆炸声开展了大量时频分析与声源特性探讨,并不断对分析方法进行改进,但需要指出的是,多数分析是建立在整个测量信号基础上,并未能将本源直达信号分量提取出来,因此在所得频谱对真实声源进行描述的准确性方面还有待商榷。本文提出一种利用局部相关峰进行直达信号标记的方法,从而能截取本源直达声片段,利用 HHT 获取较为纯净的声源频谱特性,并基于射线理论与浅水环境条件下的水下爆炸实验结果对该方法进行了初步验证。此外讨论了声源深度以及与接收器相对位置对爆炸声特性的影响。

1 标记算法

1.1 水声信号

由于真实的环境背景、界面反射与散射、介质散射以及变化的声速梯度,爆炸声信号中将混杂大量噪声以及来自不同传播路径的分量,如图 1(a)所示,因此可以将水听器接收到的声压信号 P 表示为各主要分量 p_i 在时间尺度上的叠加:

$$P(t) = \sum_{i_d=1}^{n_d} p_{i_d}^d(t) + \sum_{i_r=1}^{n_r} p_{i_r}^r(t) + \sum_{i_s=1}^{n_s} p_{i_s}^s(t) + \sum_{i_b=1}^{n_b} p_{i_b}^b(t) \quad (1)$$

式中: n 表示各类声分量的数目;角标“d”,“r”,“s”和“b”分别表示直达声(计入与直达声波形相似的,具有较高幅值的直达脉动分量)、界面反射声、界面散射声和背景噪声(计入体积散射声)。

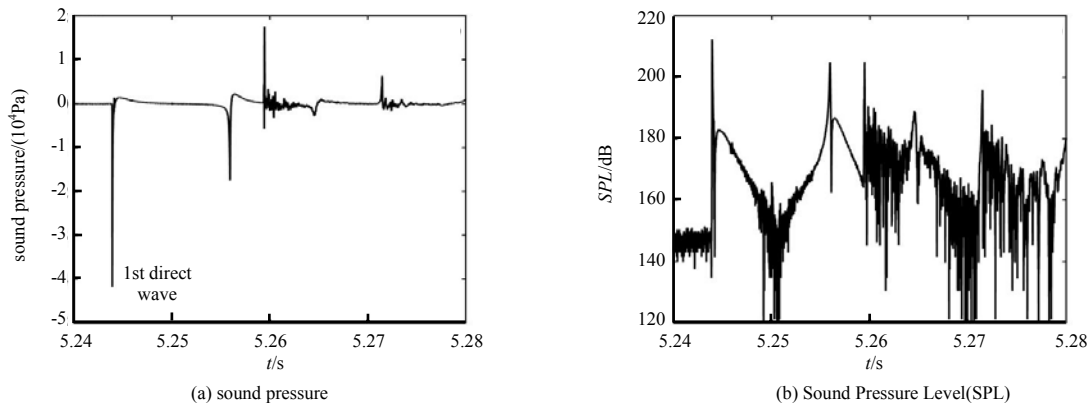


Fig.1 Typical profile of underwater explosion sound signal(reference pressure $P_r:1 \mu\text{Pa}$)

图 1 典型水下爆炸声(参考声压 $P_r:1 \mu\text{Pa}$)

由式(1)可知水声信号的分量构造非常复杂,但根据文献[18],若考虑粗糙的海面和海底,则散射系数约为数十个 dB,故相对于直达声与界面反射声,近程传播条件下(约 0.1~1 km)的界面散射声分量可以忽略。因此式(1)

可简化为:

$$P(t) = \sum_{i_d=1}^{n_d} p_{i_d}^d(t) + \sum_{i_r=1}^{n_r} p_{i_r}^r(t) + \sum_{i_b=1}^{n_b} p_{i_b}^b(t) \quad (2)$$

需要注意的是,不同路径的直达声与界面反射声到达水听器的时刻均不同,且一般来说,界面反射声将滞后于直达声到达。设首个直达声到达水听器的时刻为 T_1 (可利用声压或声压级波形获取),则任意直达声与界面反射声可表示为:

$$p_i(t) = \begin{cases} 0, & t < (T_1 + \Delta T) \\ \hat{p}_i(t - T_1 - \Delta T_i), & t \geq (T_1 + \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \hat{p}_i 表示该声分量以到达时刻为参考 0 时刻的压力历史序列; ΔT_i 表示该声分量与一次直达声到达水听器的时刻之差,可以根据实验测得或利用声速剖面进行计算获取。

1.2 算法设计

由图 1(a)可知,压力波形变化非常剧烈。为更好地观察波形细节,采用声压级(Sound Pressure Level, SPL)^[18] 进行描述:

$$SPL = 20 \lg \frac{|P|}{P_r} \quad (4)$$

如图 1(b)所示,可见声压级随时间的变化要比声压值平缓得多,且呈现出一定的时间序列特性。由于声分量会随着传播时间与传播距离的增大而衰减,故一次直达声压级 SPL_1^d 在整个声压级波形上对应着最大压力峰,且由于该分量最早到达水听器,故受其他分量的干扰也较少,可作为参考信号或基准信号。

尽管不同路径对应的直达声分量幅值不相同,即所携带信息的绝对特征不同,但由于这些分量都是来自同一个声源,因此可以推断,当传播距离可比拟时(如近程条件),它们的信息在时间尺度上的相对排列特征应当可以保持相似。在此前提下,若直达声分量具有很高的自相关性,则利用一次直达声分量作为参考信号,通过计算与比较互相关系数来对其他直达声分量进行搜索标记,并结合标记结果进行算法参数优化。具体设计算法如下:

1) 标记一次直达波

直接标记到达时刻 T_1 , T_1 满足如下条件:

$$SPL(T_1) = \max \{SPL\} \quad (5)$$

2) 声压级序列二值化

由于到各直达声分量幅值不同,故引入自适应阈值法来削弱信息绝对大小的影响,并采用如下规则将声压级序列变换为 0-1 序列:

$$Se(j) = \begin{cases} 0, & SPL(j) \leq SPL_{th} \\ 1, & SPL(j) > SPL_{th} \end{cases}, j = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

式中: SPL_{th} 为所设阈值; Se 为变换得到的二值码 0-1 序列,其中

$$SPL_{th} = BL + \gamma (\max \{SPL(j), SPL(j+1), \dots, SPL(j+w_{th})\} - BL) \quad (7)$$

式中: BL 为背景声压级; γ 为相对声压级幅值; $w_{th}+1$ 为观察窗口包含的数据点数目; j 为声压级数据序号。

3) 参考序列截取

设定序列截取宽度 $W_r = 2w_r + 1 = w_{th} + 1$ (为便于计算,引入半宽度 w_r),可得参考序列为:

$$R = \{Se(I_1 - w_r), \dots, Se(I_1), \dots, Se(I_1 + w_r)\} \quad (8)$$

式中 I_1 为 $SPL(T_1)$ 对应的数据序号。

4) 相关函数计算

对于任意一个 Se 序列观察段 C_k (与 R 等长),按照如下规则计算其与参考序列 R 的互相关函数^[19]:

$$MF(k) = \frac{1}{2w_r + 1} \sum_{m=1}^{2w_r+1} [C_k(m) \text{ or } R(m)], k = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

式中:“or”表示同或运算; MF 为相关函数值; k 为观察片段序号。随着观察窗口的不断移动和更新,将连续获得一系列的 MF 值。此外,从式(9)可见 MF 取值为 0~1,且若 C_k 为全 0 序列,则对应相关函数值为 0.5。

5) 其余直达波标记

在一系列的 MF 值的基础上,通过搜索局部相关峰对其余的直达波进行标记。若考虑一个参考序列宽度内至多只出现一个有效相关峰,则可将 MF 以 W_r 为单元长度进行划分,利用如下 3 个条件来搜索和辨识局部片段的

有效峰值的中心位置 $J(n)$:

a) 最大值条件: $MF[J(n)] = \max\{MF[(n-1)W_r + 1], \dots, MF(nW_r)\}$, $n = 1, 2, 3, \dots$;

b) 阈值条件: $MF(J(n)) > MF_{th}$, 其中 MF_{th} 为相关峰阈值;

c) 极大值条件: $MF(J(n)) > MF(J(n)-w_t) \& MF(J(n)) > MF(J(n)+w_t)$, 其中 w_t 为极大值搜索半宽度。

其中需要注意的是, 在某些局部片段上 $J(n)$ 可能为空, 即不存在有效局部峰位置。利用步骤 5) 可将有效的局部相关峰, 即可信的其余直达声分量标记出来, 然后将相应的中心位置 $J(n)$ 依次记入集合 Q (纳入首次直达声的中心位置)。

利用 Q 中的位置信息 q , 可以将直达声的声压片段 C_q 表示为如下序列:

$$C_q = \{P(T_q - T_r), \dots, P(T_q), \dots, P(T_q + T_r)\}, q \in Q \quad (10)$$

其中间变量

$$\begin{cases} T_r = w_r / f_s \\ T_q = q / f_s + T_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_r 与 T_q 分别表示时间尺度上的声压片段半宽度和中心位置; T_0 为水听器接收到声压信号的时刻; f_s 为信号的采样频率。

不同的标记算法参数将产生不同的局部相关峰结果, 如可达到的相关峰最大值和标记出的直达声数目。因此需要对算法参数进行优化, 以确定出最佳的参考序列长度, 进而能够捕获最优的一次直达声序列片段供后续分析。一般来说, 期望获得较高的局部相关峰, 即序列匹配度高, 同时也希望得到数量较多的, 并具有较大宽度的有效直达声分量, 即能够更好地削弱或规避干扰成分。据此, 构造如下评估函数(是为了对放大结果差异, 将相关峰减去 0.5):

$$\text{Max} : G(t_r, \gamma, \lambda_t) = W_r \sum_{i=2}^n (MF[Q(i)] - 0.5) \quad (12)$$

其中间变量

$$\begin{cases} t_r = W_r / f_s \\ \lambda_t = w_t / w_r \end{cases} \quad (13)$$

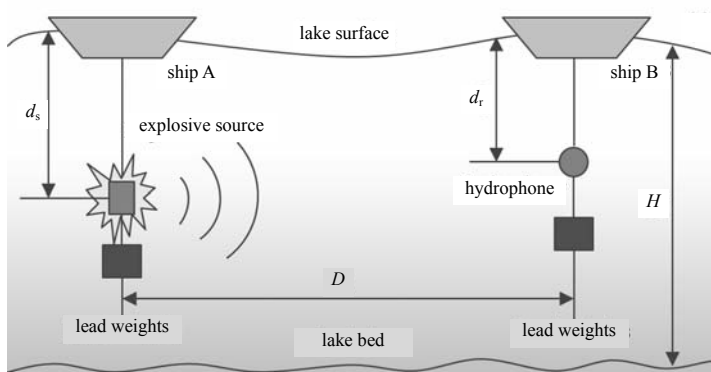
式中: t_r 与 λ_t 分别表示参考序列在时间尺度上对应的宽度和窗长比, 前者以及参数 γ 影响相关函数计算值, 后者影响局部峰的有效性判别。将式(12)最大化即为算法参数的优化目标。

在识别出直达声片段后, 便可以利用 HHT 对其进行时频分析以获得真实的声源频谱特性。

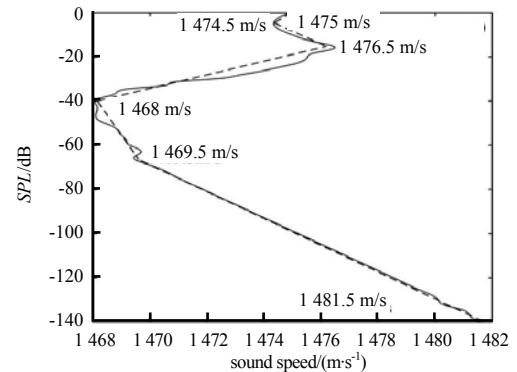
2 水下爆炸实验

2.1 实验布置

单发水下爆炸声测量实验于春季在抚仙湖试验场进行, 详细布置如图 2(a)所示。



(a) detailed experimental layout



(b) sound speed profile versus depth

Fig.2 Experiments for measuring sounds by underwater explosion in the Fuxian Lake testing field

图 2 水下爆炸实验

具体实验条件为: 实时风速 4~5 m/s; 平均水深 140 m, 湖床表层主要为砂石和淤泥; 船 A 到船 B 的距离由 GPS 定位确定; 爆炸源为 24 g JO-9(密度 1.831 kg/cm³, 爆速 8 333 m/s, 爆热 5 755 kJ/kg), 壳体为 1 mm 聚碳酸酯。

表1 测量条件
Table1 Measuring conditions in 4 experiments

No.	hydrophone type	sensitivity/dB	gain/dB	f_s /kHz	D	d_s /m	d_r /m
1	BK8106	-172±3	0	384.0	49	40	40
2	BK8106	-172±3	0	384.0	903	40	40
3	BZS10-01	-207.8±3	0	192.0	49	100	70
4	BZS10-02	-207±3	12	204.8	836	100	80

由表1可知,实验1与实验3为超近程传播条件,实验2与实验4为近程传播条件。文献[20]中给出了抚仙湖的声速与温度的经验关系:

$$c(h, T) = c_0 + \kappa_1 T - \kappa_2 T^2 + \kappa_3 h \quad (14)$$

式中: $c_0=1403.9$ m/s, 为湖面声速; κ_1, κ_2 和 κ_3 是由实验测得的常数, 分别为 4.792, -0.042 8 和 0.016 2; T 为湖水温度; h 为水深。利用式(15)和抚仙湖的春季温度剖面^[19], 可计算出相应的声速剖面, 如图2(b)所示。

2.2 实验结果

考虑当局部声压峰值与一次直达声压峰值比值小于截断阈值 e 时, 直达声完全被淹没, 则可得各实验条件下包含足够多有效直达声分量的信息序列, 如图3所示(为便于比较, 进行了平移操作)。

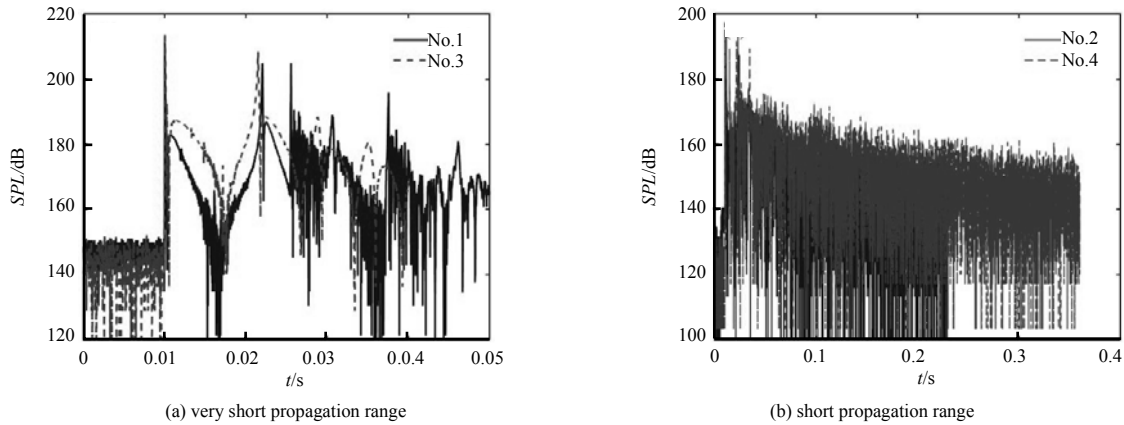


Fig.3 Experimental result of the sound pressure level($e=1\%$)

图3 声压级结果($e=1\%$)

由图3可知:各声压级波形均是先从相对平稳的背景声压级开始突跃至峰值,然后伴随着持续的脉动随时间缓慢衰减,并且呈现出明显的序列特性;在该水域条件下,各声压信号中均包含众多具有较高幅值的直达声分量,且随着传播距离的增大,直达声分量的幅值趋于减小,但随着时间的衰减速度变缓;随着爆炸源深度的增加,直达声分量的数目趋于减少,但对应的脉冲宽度变宽。此外,还可看到界面散射声与反射声等引起的混响作用,这种作用削弱了声压级的衰减,使得爆炸声能够在更长的距离上传播,但对直达声辨识的影响是负面的。

3 讨论

3.1 算法验证

文献[18]指出,射线理论在浅海近程传播条件下是适用的,故首先基于该理论对直达声数目进行计算,并给出各传播条件下的声线示意,如图4所示。

由图4可知,不同传播条件对应的声线族差别较大。对于实验1和实验2($d_s=40$ m),在小出射角范围内,从爆炸源到水听器存在多条直达声路径;对于实验3和实验4($d_s=100$ m),直达声路径要少得多。可结合图2(b)给出解释:实验水域的声速剖面存在拐点,拐点位置以上近似为负声速梯度,拐点位置以下近似为正声速梯度,因此在拐点附近的深度范围内,将出现直达声道,而实验1和实验2中,爆炸源和水听器所处的位置几乎刚好为声速剖面的拐点,因此存在较多的直达声路径,带来了较多直达声分量;而实验3和实验4中,爆炸源和水听器均处于正声速梯度区域,因此声线始终向低声速区单向弯曲,尤其是实验4中,声线弯曲程度很大,使得水听器只能接收到少量直达声。

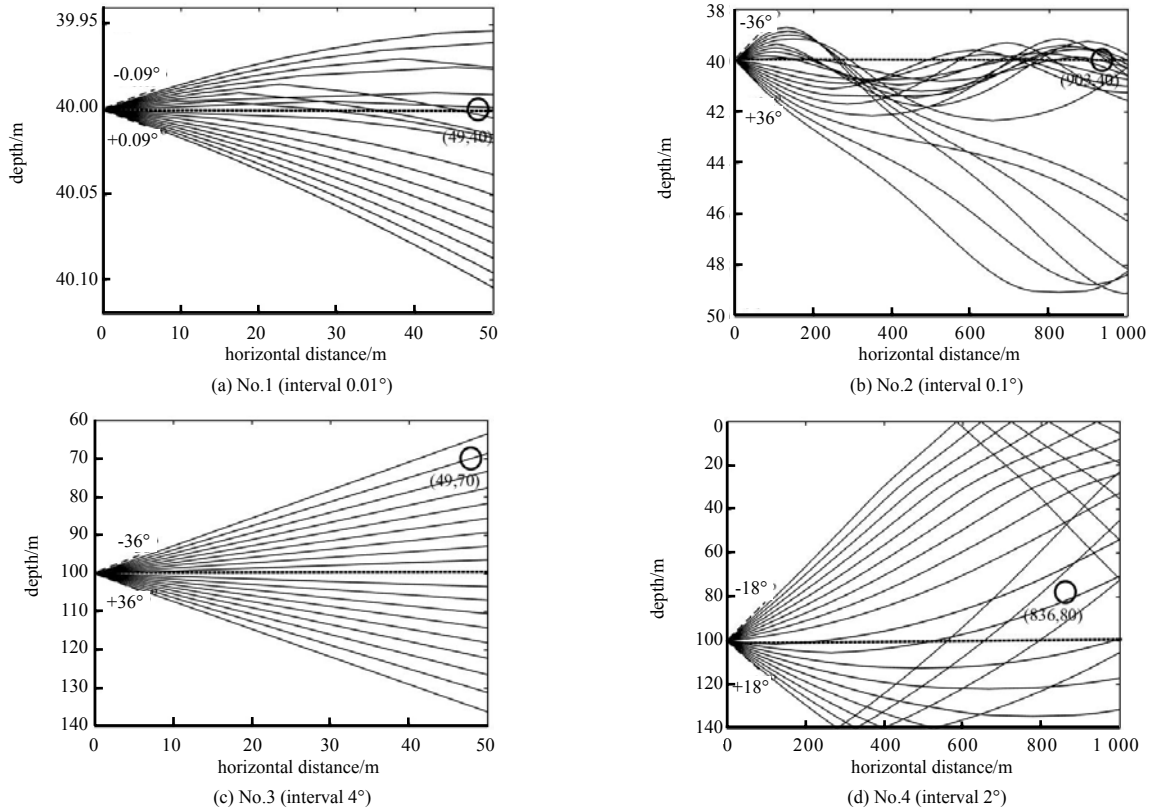


Fig.4 Sound ray groups under different propagation conditions
图 4 不同传播条件下的声线族

以实验 1 为例进行标记算法验证。首先根据射线理论计算出各出射角条件对应声线到达水平距离 $D=49\text{ m}$ 处的位置如图 5 所示。由图 5 可知, 随着出射角的增大(考虑符号), 声线到达位置具有向上移动的趋势, 但在 0° 附近出现了多次振荡, 与水听器竖直位置约重合 7 次, 因此可粗略估计出 7 个直达声分量。

再利用标记算法对实验 1 声压结果中的直达声进行标记, 并考虑算法参数优化(图 6)以获取最佳参考序列长度。由图 6 可知, 当所取的参考直达声时间宽度较小时, 随着相对声压级幅值的增大, 标记算法效果趋于改善; 当所取参考直达声时间宽度较大时, 随着相对声压级幅值的增大, 评价函数具有先增大后减小的趋势, 存在最优直达声时间宽度(约 1.8 ms)。

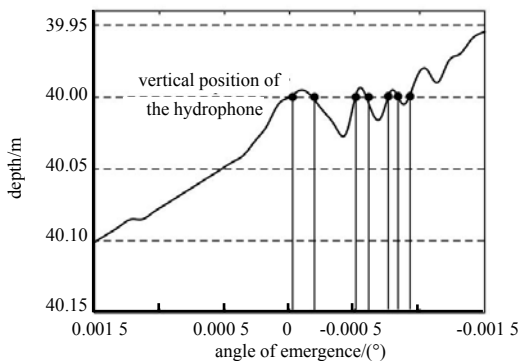


Fig.5 Vertical arrival locations of different sound rays under conditions of experiment No.1.
图 5 实验 1 条件下不同声线到达的竖直位置

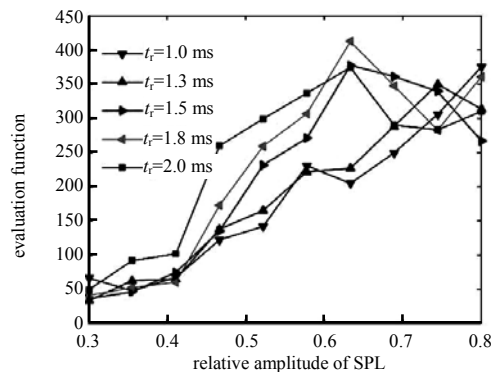


Fig.6 G versus γ and t_r in the experiment No.1($\lambda_r=0.1, MF_{th}=0.7$)
图 6 实验 1 对应的 G, γ 和 t_r 的关系($\lambda_r=0.1, MF_{th}=0.7$)

设置最优算法参数对实验 1 结果中直达声分量进行标记, 如图 7(a)所示, 可以看出直达声信号序列的相关峰图非常尖锐, 即具有很强的自相关性。此外可方便地观察到 8 个局部相关峰, 包括存在 2 个弱峰, 即 6~8 个直达声分量, 与射线理论所获结果 7 相近。综上可知该标记算法能有效地识别出直达声分量。

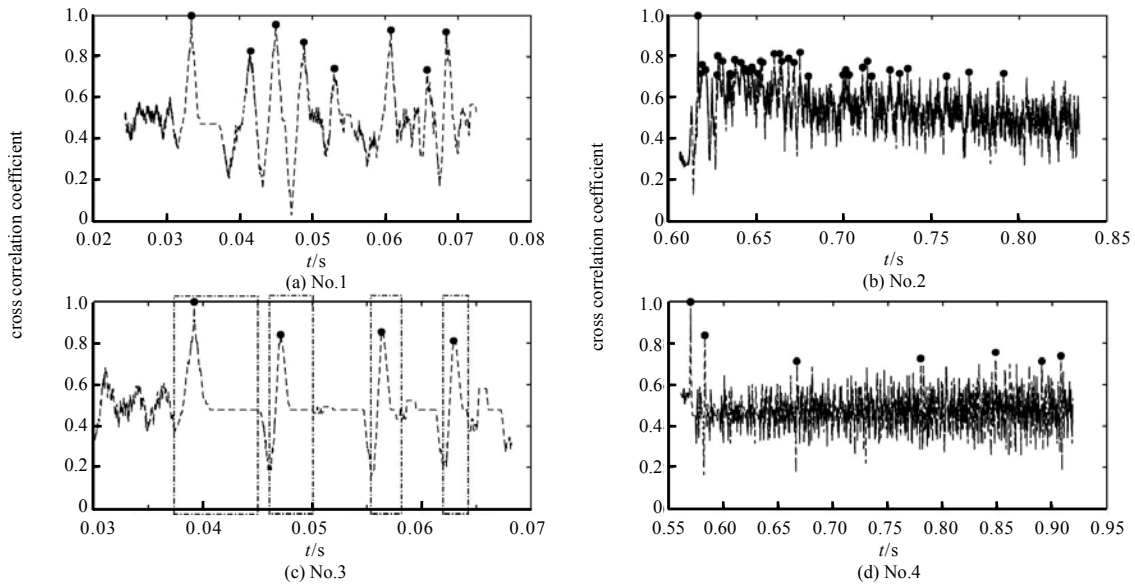


Fig.7 Marking results of the direct sound components
图 7 直达声分量标记结果($\lambda_t=0.1$)

3.2 直达声标记

对实验 2、3、4 的声压结果重复上述算法过程, 可得对应直达声分量标记结果如图 7(b)~7(d)。对比图 7 中各实验的标记结果可以发现, 直达声分量对应的相关峰随着时间的推移, 呈现下降的趋势, 这是由于随着时间推移, 直达声分量幅值快速衰减, 而后续的界面反射声和背景噪声逐渐被水听器所接收, 使得直达声逐渐淹没于其中。此外还可以看到实验 1 和实验 2($d_s=40$ m)中对应的直达声分量要远多于实验 3 和实验 4($d_s=100$ m)对应的直达声分量, 尤其是实验 4 中标记出的直达声分量很少, 这些与基于射线理论所得图 4 中反映的结论相吻合。

3.3 频谱分析

对各次实验中所截取的一次直达声分量进行 HHT^[12], 得到边际谱如图 8 所示。

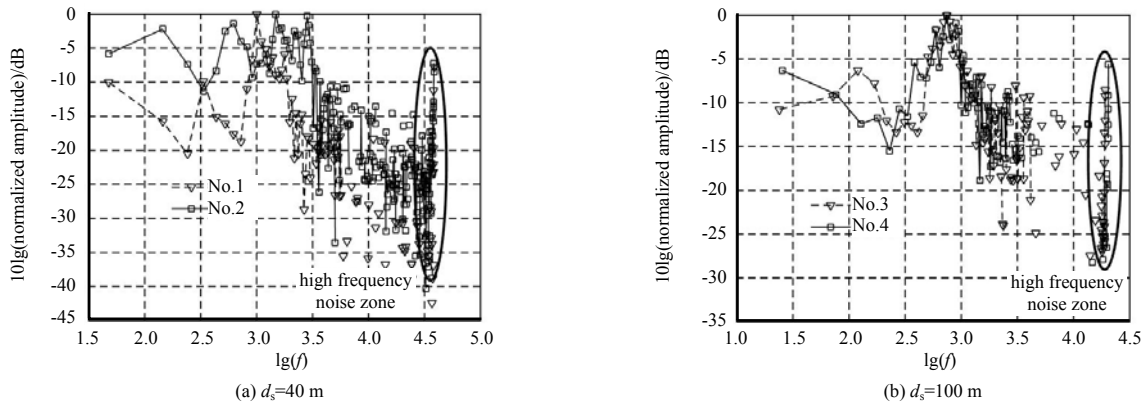


Fig.8 Logarithmic marginal spectra of the direct sound components
图 8 一次直达声分量的对数化边际谱

由图 8 可知, 对于同一爆源, 不同位置水听器接收到的峰值频率(约 1 kHz)和主频带(约 0~10 kHz)近似稳定, 但是随着传播距离的增大, 低频信号逐渐占据主导, 这是因为水体对高频信号的吸收能力要大于低频信号, 高频信号衰减较快; 随着爆源深度的变化, 水听器在较近距离内所接收到的频谱变化不大, 但是当距离较远时, 水听器接收到频谱存在明显差异, 这是因为声速剖面变化影响了声音传播的轨迹, 故压力衰减特征也不同。此外, 在图 8(a)和 8(b)中还可以明显看到一个背景噪声引起的独立且连续的高频区, 可见所提出的算法能够抵抗(削弱或规避)一定的噪声干扰, 从而分离出相对“纯净”的直达声分量, 但是相对于实验 3 和 4, 实验 1 和 2 中的直达声片段质量稍差, 这是由于该 2 次实验中爆源均处于声速剖面拐点深度, 声干涉较复杂, 使得噪声和本源直达信号的分离难度增加。

4 结论

本文提出了一种对水下爆炸直达声分量进行标记和截取的算法,并基于水下爆炸实验结果,利用HHT观察了较为真实的声源频谱特性和实验布置对该特性的影响。主要结论如下:

1) 从相对平稳的背景声压级开始,水下爆炸声压级波形先突跃至峰值,然后随时间缓慢衰减,并伴随着持续的脉动,呈现出明显的时间序列特性,且在近程条件下其相对排列特征近似保持稳定;

2) 直达声分量对应的时间序列具有良好的自相关性,使得所提出的算法能有效地辨识局部相关峰,标记出直达声分量,特别是在超近程条件下的相关峰可达0.9以上,所辨识出的直达声分量数目与基于射线理论计算出的结果吻合较好;

3) 随着水听器与声源相对位置的变化,接收到的爆炸声峰值频率(约1 kHz)和主频带(约0~10 kHz)始终近似是稳定的,但是随着传播距离的增大,低频信号逐渐占据主导,且传播距离较远时,声速剖面的影响使得水听器接收到的声频谱形状随爆源深度变化,而发生明显改变。

参考文献:

- [1] MAKAR A. Estimation of the time delay of hydroacoustic signals for passive location of underwater objects[J]. *Archives of Acoustics*, 2004,29(3):435-445.
- [2] FEBRIN A R,SEKINE M,NOGUCHI H,et al. Modeling the preference of ayu(*Plecoglossus altivelis*) for underwater sounds to determine the migration path in a river[J]. *Ecological Modelling*, 2015(299):102-113. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.12.010.
- [3] ZHANG J C,HAN Y F,ZHENG C E,et al. Underwater target localization using long baseline positioning system[J]. *Applied Acoustics*, 2016(1110):129-134. doi:10.1016/j.apacoust.2016.04.009.
- [4] 汪德昭,尚尔昌. 水声学[M]. 北京:科学出版社, 2013. (WANG Dezha,SHANG Erchang. *Underwater acoustics*[M]. Beijing:Science Press, 2013.)
- [5] VADOV R A. Long-range sound propagation in the northwestern region of the Pacific Ocean[J]. *Acoustical Physics*, 2006, 52(4):371-391. doi:10.1134/S1063771006040026.
- [6] SOLOWAY A G,DAHL P H. Peak sound pressure and sound exposure level from underwater explosions in shallow water[J]. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2014,136(3):EL218-223. doi:10.1121/1.4892668.
- [7] WESTON D E. Underwater explosions as acoustic source[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1960,76(2):233-249. doi:10.1088/0370-1328/76/2/307.
- [8] 潘正伟,焦善武,顾晓辉. 水下爆炸——高功率宽频带的水声干扰源[J]. *南京理工大学学报*, 1999,23(6):507-509,526. (PAN Zhengwei,JIAO Shanwu,GU Xiaohui. Underwater explosion is an acoustic interference source with high power and wide band[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1999,23(6):507-509,526.)
- [9] 吴成,廖莎莎,李华新,等. 水下爆炸的一些声学特性分析[J]. *北京理工大学学报*, 2008,28(8):719-722. (WU Cheng, LIAO Shasha,LI Huaxin,et al. Analysis of acoustic characteristics for HE charge underwater explosion[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008,28(8):719-722.) doi:10.15918/j.tbit1001-0645.2008.08.003.
- [10] 贾虎,沈兆武. 金属导爆索的爆炸水声特性[J]. *爆炸与冲击*, 2011,30(9):243-247. (JIA Hu,SHEN Zhaowu. Characteristics of underwater detonation acoustic signals of fiber-based detonating cord based on wavelet analysis and power spectrum[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011,30(9):243-247.) doi:10.11883/1001-1455(2011)04-0428-05.
- [11] 张志华,李万,罗荣,等. 两装药水下爆炸毁伤目标振动信号时频分析[J]. *振动与冲击*, 2013,32(9):79-83. (ZHANG Zhihua,LI Wan,LUO Rong,et al. Time-frequency analysis of vibration signal of underwater target subjected to underwater explosion of two explosive charges[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(9):79-83.) doi:10.3969/j.issn.1000-3835.2013.09.015.
- [12] HUANG N E,SHEN Z,LONG S R,et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceeding of the Royal Society A*, 1998,454(1971):903-995. doi:10.1098/rspa.1998.0193.
- [13] VELTCHEVA A D,SOARES C G. Identification of the components of wave spectra by the Hilbert Huang Transform method[J]. *Applied Ocean Research*, 2004,26(1/2):1-12. doi:10.1016/j.apor.2004.08.004.
- [14] DATIG M,SCHLURMANN T. Performance and limitations of the Hilbert-Huang Transformation(HHT) with an application to irregular water waves[J]. *Applied Ocean Research*, 2004,31(14):1783-1834. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.03.007.

- [15] PENG Z K, TSE P W, CHU F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005(286):187-205. doi:10.1016/j.jsv.2004.10.005.
- [16] MURUGAN S S, NATARAJAN V, MAHESWARAN K. Analysis of EMD algorithm for identification and extraction of an acoustic signal in underwater channel against wind driven ambient noise[J]. China Ocean Engineering, 2014,28(5):645-657. doi:10.1007/s13344-014-0051-2.
- [17] 程播, 韩焱, 王鉴, 等. 基于改进HHT的水中爆炸冲击波信号时频特性分析方法[J]. 爆炸与冲击, 2011,31(3):326-331. (CHENG Lei, HAN Yan, WANG Jian, et al. Time-frequency representation analysis in underwater explosive shock wave signals based on an improved HHT method[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(3):326-331.) doi:10.11883/1001-1455(2011)03-0326-06.
- [18] URICK R J. Principles of underwater sound for engineers[M]. New York:McGraw-Hill Press, 1967.
- [19] 解楠, 张富堂. 基于伪码互相关特性的GPS信号捕获算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(3):247-251,265. (XIE Nan, ZHANG Futang. GPS signal acquisition algorithm based on PN code cross-correlation properties[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(3):247-251,265.)
- [20] 罗松, 高俊荣. 抚仙湖各个月份的温度剖面[J]. 声学与电子工程, 2000(1):35-39. (LUO Song, GAO Junrong. Temperature profiles of the Fuxian Lake in each month[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2000(1):35-39.)

作者简介:



刘磊(1993-), 男, 江苏省泰州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为计算均质化和声学超材料等。email:l.liu@student.tue.nl.

郭锐(1980-), 男, 山东省海阳市人, 副教授, 主要研究方向为水下爆炸与毁伤评估等。

刘荣忠(1955-), 男, 江苏省仪征市人, 教授, 主要研究方向为水声对抗技术等。

2018年空间电子学学术年会征文通知

为了推动空间电子技术的发展, 拟定于2018年9月中旬在天津召开“2018年空间电子学学术年会”。本届年会由中国航天科技集团有限公司科技委卫星有效载荷技术专业组、中国空间技术研究院科技委通信与导航有效载荷专业组、中国电子学会空间电子学分会、中国宇航学会空间电子学专业委员会等主办, 由中国空间技术研究院西安分院、天津大学微电子学院等联合承办, 现面向国内外从事有关空间电子技术的各科研单位技术人员、高等院校广大师生征集论文。本次会议的主题为“牵引空间信息技术发展、助推我国航天强国建设”。会议将采取大会特邀报告、分组讨论、论文评审相结合的方式进行学术交流。会议将出版论文集, 并评选优秀论文。现将征文有关事项通知如下:

一、征文范围: 空间电子学领域的国内外动态、综述、发展建议及前景展望; 通信卫星有效载荷技术; 微波遥感与光学遥感技术; 卫星电子侦察及预警载荷技术; 卫星导航技术; 深空通信与测控技术; 星间链路与捕获跟踪、组网技术; 海量数据高速存储、压缩与传输技术; 空间大型天线及其展开技术; 合成孔径雷达与动目标检测技术; 空间激光通信和微波光子技术; 大规模集成电路、抗辐射、抗单粒子效应技术其他有关技术。

二、来稿要求: 具体要求请见网站www.iaeej.com

三、联系方式:

航天五院西安分院科技委: 马逸君 18706709777/029-85673708, 于晓乐 13572250226/029-89253161

传 真: 029-89253222

天津大学微电子学院: 张志超 13920027254

投稿网站技术联系人: 邓伟 13227067800 /029-85613384, 传 真: 029-89253222