

船舶水下辐射噪声信号理论模型及仿真

孙军平 杨军 林建恒 蒋国健 衣雪娟 江鹏飞

Theoretical model and simulation of ship underwater radiated noise

Sun Jun-Ping Yang Jun Lin Jian-Heng Jiang Guo-Jian Yi Xue-Juan Jiang Peng-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 124301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.124301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多项式调频 Fourier 变换的信号分量提取方法

Signal component extraction method based on polynomial chirp Fourier transform

物理学报.2016, 65(8): 080202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080202>

混沌干扰中基于同步挤压小波变换的谐波信号提取方法

Harmonic signal extraction from chaotic interference based on synchrosqueezed wavelet transform

物理学报.2015, 64(10): 100201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100201>

一种用于光纤链路振动信号模式识别的规整化复合特征提取方法

A regular composite feature extraction method for vibration signal pattern recognition in optical fiber link system

物理学报.2015, 64(5): 054304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054304>

基于无线传感器网络的地震信号特征提取方法研究

A novel approach to research on feature extraction of seismic wave signal based on wireless sensor networks

物理学报.2013, 62(10): 104301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104301>

船舶水下辐射噪声信号理论模型及仿真*

孙军平¹⁾⁴⁾ 杨军²⁾ 林建恒^{1)3)†} 蒋国健¹⁾ 衣雪娟¹⁾ 江鹏飞¹⁾

1)(中国科学院声学研究所北海研究站, 青岛 266023)

2)(中国科学院噪声与振动重点实验室, 北京 100190)

3)(中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

4)(中国科学院大学(信息工程研究所), 北京 100049)

(2015年11月25日收到; 2016年4月1日收到修改稿)

分析典型船舶水下辐射噪声实验数据, 获取船舶水下辐射噪声功率谱特征, 阐明了准周期随机声脉冲序列信号模型作为船舶水下辐射噪声模型的合理性和普适性, 在此基础上, 引入爆炸衰减型余弦脉冲信号作为该模型的基本组成单元, 给予理论分析, 据以数值构建船舶辐射噪声, 并与海上试验获取的商船辐射噪声数据进行对比, 结果明显一致, 证明了该方法的有效性和实用性.

关键词: 实验数据, 准周期随机声脉冲序列, 爆炸型余弦脉冲信号

PACS: 43.30.Nb, 43.30.Jx, 43.60.Hj, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.65.124301

1 引言

船舶水下辐射噪声研究对军事、经济以及环境保护都具有重要意义. 船舶水下辐射噪声研究可以追溯到二战期间^[1], 之后众多的国内外专家专注于此领域^[2-15]. 我国学者对船舶水下辐射噪声信号建模做了大量的研究, 最早始于蒋国健、陶笃纯、吴国清等^[16-19]为代表的老一辈研究者. 当船舶水下辐射噪声信号模型建立以后, 就需要进行计算机仿真, 这对开展海洋信道船舶水下辐射噪声特性研究以及声呐定型、船舶隐身等方面的前期准备工作具有重要意义和实际价值, 可以大量减小人力物力, 并且极大地提高研究效率. 有效的计算机模型仿真, 意味着人工智能生成船舶目标噪声的实现, 一方面可以为研究水下目标被动检测、识别提供目标信息源, 另一方面如果未来得到硬件实现, 则可以作为一种逼真、有效的声诱饵使用.

目前对船舶水下辐射噪声信号的仿真方式较多, 其中最主要的方式是通过高斯白噪声进行滤波获取辐射噪声中的连续谱, 对于线谱则采用正弦

信号叠加的方式^[20-25], 该方法比较简便、直接, 但是船舶在大多数工况下, 其辐射线谱并不是以正弦波形式直接叠加到宽带连续谱上, 因此在仿真分析研究海洋信道中船舶辐射噪声特性方面存在局限性; 另外一种是周期性局部平稳过程建模的仿真^[17], 即窄带平稳高斯噪声被周期性慢变化函数调制, 产生线谱和连续谱叠加的仿真信号; 第三种是结合船舶产生辐射噪声源的物理过程^[26-28], 用准周期随机声脉冲序列模型仿真, 它对船舶噪声中机械旋转产生的壳体振动噪声、螺旋桨噪声等都具有良好的适应性. 本文将在最后一种方法基础上, 开展深入的研究.

2 浅海船舶水下辐射噪声测量及数据处理

2.1 实验测量方法以及数据处理方法

在某浅海进行船舶水下辐射噪声测量, 具体实验方案如图1所示.

* 国家自然科学基金(批准号: 11174314, 11204345, 11474301)和声场声信息国家重点实验室(批准号: SKLA201502)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linjh@mail.ioa.ac.cn

在某浅海海域,将自容式水听器固定于坐底铁架上,一同置入海底,被测船舶在水听器上方附近海面通过时,其辐射噪声将被自动记录下来.

对采集数据进行功率谱分析(傅氏变换),

$$X(f_n) = \text{FFT}(x(t)), \quad (1)$$

式中, $f_n = nf_s/N$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$, f_s 为采样频率, N 为截取的信号数据点数, $x(t)$ 为水听器接收船舶水下辐射噪声时域信号.

噪声的功率谱密度可以表示为:

$$NL1(f_n) = 10 \lg |X(f_n)|^2 - 20 \lg N - S - 10 \lg(\Delta f), \quad (2)$$

(2) 式中, $S(\text{dB})$ 为水听器灵敏度,以 $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ 为参考, $\Delta f = f_s/N$ 为频率分析带宽.

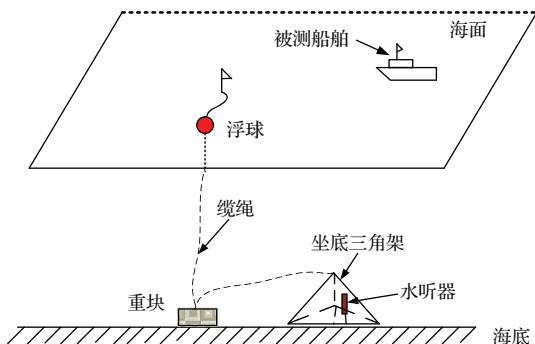


图1 船舶水下辐射噪声测量方案

Fig. 1. The measurement scheme of underwater radiated noise of ship.

2.2 实验数据处理

选取在某近海测量获取的多条非合作典型船舶(不同类型商船、渔船)的水下辐射噪声作为样本进行分析.

图2和图3是某集装箱船的时频分析结果,该船长366 m,宽52 m,吃水12.9 m,航速20.3节,距离水听器最近距离大约53 m.

图2是该集装箱船时频功率谱,可以看到该船高速通过水听器附近,在80—100 s期间接收的声强最高,图示频段周围环境噪声大约在60—80 dB之间;图3是该集装箱船功率谱分析,选取时间为正横位置前后5 s时间,可以看到在40 Hz以前,功率谱的强度是随频率的增加而升高的,增长幅度大约是每倍频程10 dB,在40 Hz以后,却是随频率的增加而减小,变化趋势大约是每倍频程减小7—10 dB,这种变化趋势是船舶水下辐射噪声的一

个典型特征,另一个典型特征就是在功率谱峰出现位置(该功率谱峰出现位置为40 Hz,不同船略有不同)之前,存在很多线谱,其强度远远高于连续谱,甚至高达20 dB(15 Hz左右线谱).另外可以发现一个有趣的现象,功率谱分析(图3)中出现的线谱频率间隔基本保持不变,其大小大约等于第一个线谱的频率(在此为8 Hz左右),也就是表明,该商船的线谱是以谐波方式存在的.

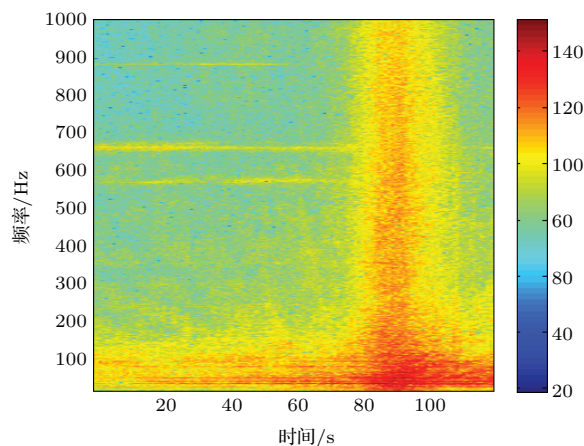


图2 (网刊彩色) 某集装箱船时频功率谱

Fig. 2. (color online) Time-frequency power spectrum of a container ship.

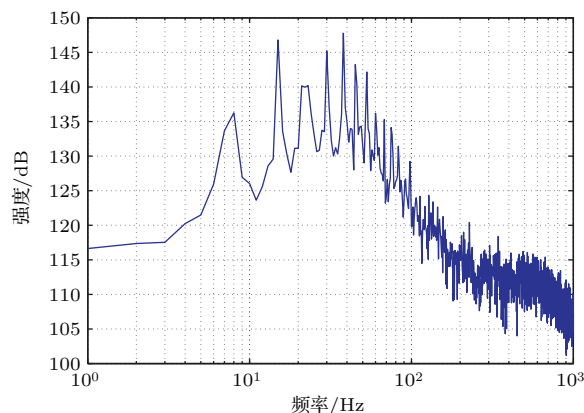


图3 某集装箱船正横位置功率谱

Fig. 3. The power spectrum of a container ship.

图4和图5是某杂货船的时频分析结果,该船长180 m,宽28 m,吃水10.5 m,航速14.3节,距离水听器最近距离115 m.

图6和图7是某渔船(编号为渔船1)的时频特征分析结果,由于没有船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据,对船的基本参数(长、宽、吃水、航速、到水听器的距离等)没有了解,但不影响数据的功率谱分析.

图 8 和图 9 是另一艘渔船(编号为渔船 2)的时频特征分析, 类似于渔船 1, 同样渔船 2 也没有 AIS 数据.

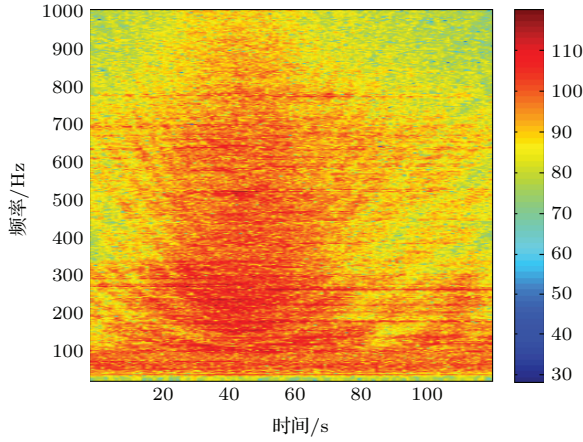


图 4 (网刊彩色) 某杂货船时频功率谱

Fig. 4. (color online) Time-frequency power spectrum of a cargo ship.

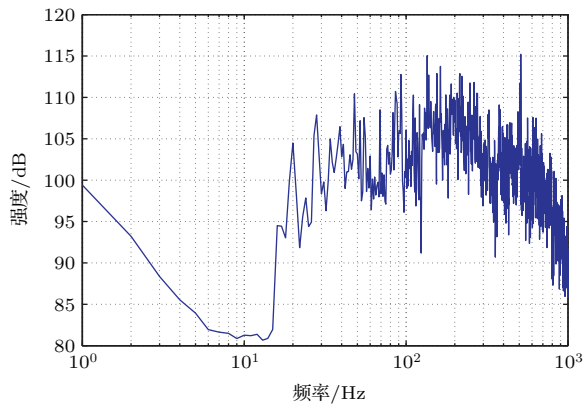


图 5 某杂货船正横位置功率谱

Fig. 5. The power spectrum of a cargo ship.

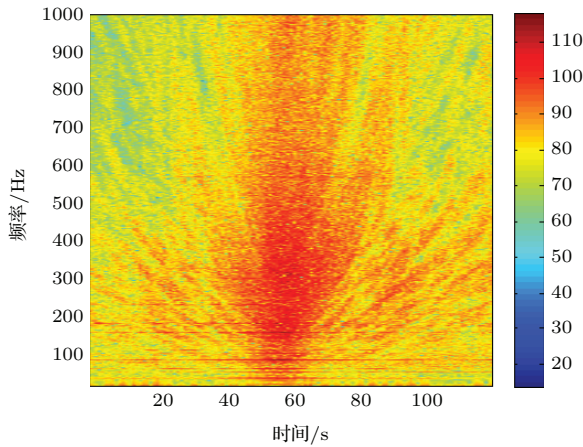


图 6 (网刊彩色) 渔船 1 时频功率谱

Fig. 6. (color online) Time-frequency power spectrum of a fishing boat.

图 10 和图 11 是某油轮的时频特性分析结果. 该船长 136 m, 宽 21 m, 吃水 6 m, 速度 12.8 节, 距离水听器最近距离大约 640 m.

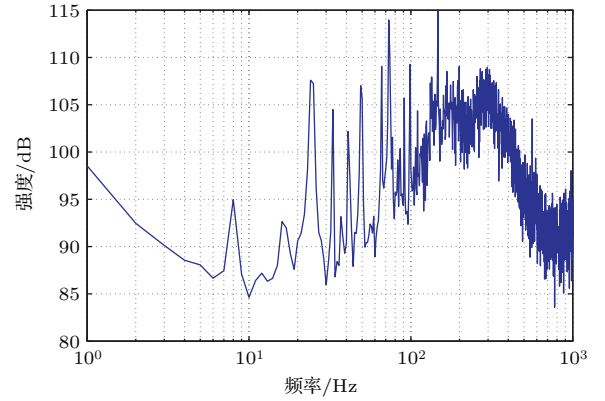


图 7 渔船 1 正横位置功率谱

Fig. 7. The power spectrum of a fishing boat.

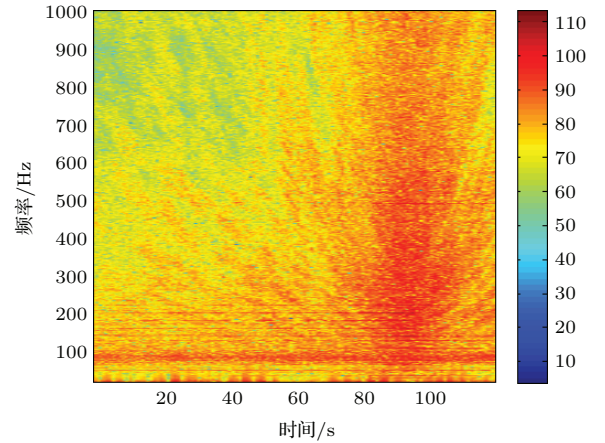


图 8 (网刊彩色) 渔船 2 时频功率谱

Fig. 8. (color online) Time-frequency power spectrum of a fishing boat.

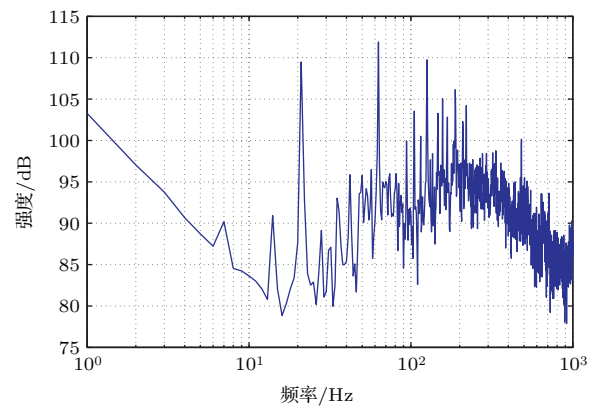


图 9 渔船 2 正横位置功率谱

Fig. 9. The power spectrum of a fishing boat.

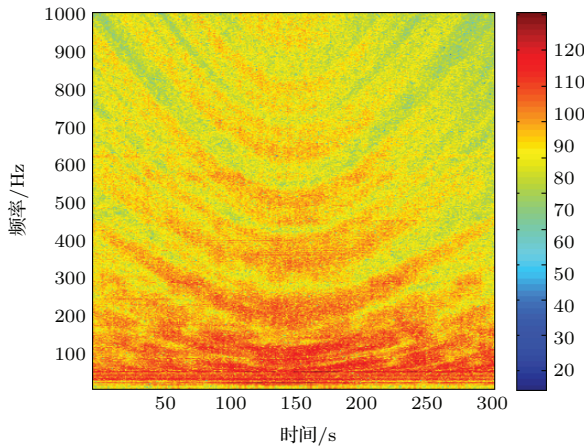


图 10 (网刊彩色) 某油轮时频功率谱
Fig. 10. (color online) Time-frequency power spectrum of a tanker.

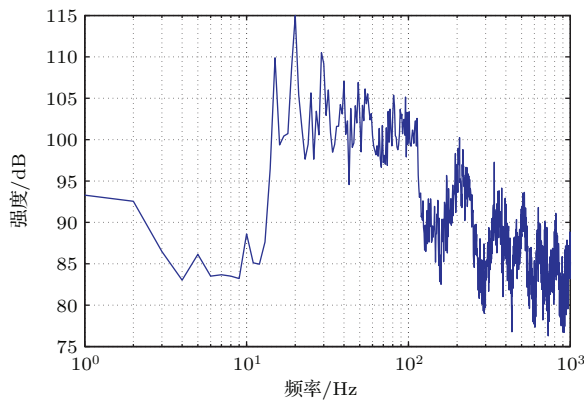


图 11 某油轮正横位置功率谱
Fig. 11. The power spectrum of a tanker.

实验数据分析主要包含了 5 条某近海典型船舶, 其中 1 条集装箱船, 1 条杂货船, 2 条渔船, 1 条油轮, 通过以上分析可以得到以下结论.

1) 船舶水下辐射噪声功率谱基本遵循随频率先增长后减小即存在谱峰的总体规律, 集装箱船以及油轮的谱峰位置大约在 40—50 Hz 之间(图 3, 图 11), 而渔船在 200—300 Hz(图 7, 图 9), 杂货船的谱峰位置在 100—300 Hz 之间(图 5), 可见不同类型船只噪声功率谱具有一定差别.

2) 功率谱在峰值位置前增长趋势大约是每倍频程 5—15 dB, 功率谱峰值后减小趋势大约是每倍频程 5—15 dB, 不同船舶具有不同变化趋势, 例如在本次样本中的渔船 2 (图 9) 增长趋势大约每倍频程 5—7 dB, 减小趋势大约每倍频程 5—6 dB, 而油轮的变化趋势较大, 其峰值位置前后的变化趋势分别达到了每倍频程 15 dB 以及 5—10 dB.

3) 船舶水下辐射噪声功率谱在谱峰位置前普遍存在大量线谱(功率谱图 3, 图 5, 图 7, 图 9, 图 11), 且基本是以谐波的方式出现. 其中第一个

明显线谱相对连续谱的强度普遍达到了 8 dB 以上, 甚至某些线谱达到了 30 dB(图 9). 线谱是船舶的重要“声纹”特征之一, 它较强的幅度给了我们复杂海洋环境中探测、识别船舶的重要机会.

分析低频线谱产生机理, 我们认为谐波特征基本来源于物体固有振动或者由具有周期性的脉冲序列信号经傅氏变换获得. 物体固有频率与物体大小有关, 在低至几赫兹的频率下, 要求物体长度大约达到 150 m (水), 500 m (钢中纵波) 或者 50 m (软木) 以上, 这与实际船舶长度是不符合的, 实际船舶基本都低于以上长度要求, 依靠船体的固有振动产生低频谐波成分的可能概率是非常小的. 但船舶在航行中产生大量的周期性序列信号, 例如电机和内燃机的周期转动、螺旋桨的周期性运动(无空泡桨声辐射和较高航速螺旋桨空泡周期性破碎)等, 将产生具有准周期性的脉冲序列信号, 该信号的傅氏变换将得到大量低频谐波成分, 是水面及水下船舶主要的辐射噪声成分. 因此, 船舶水下辐射噪声产生谐波成分主要来源于准周期性的脉冲序列信号.

3 船舶辐射噪声理论建模与数值仿真

3.1 准周期随机声脉冲序列模型及数学分析

本文采用的准周期性随机声脉冲序列船舶辐射噪声模型^[16,19], 是以声脉冲作为船舶辐射噪声信号的基本组成, 将船舶不同部位辐射噪声的时域信号表示为一系列脉冲序列的叠加形式, 它们的形状、出现时刻、持续时间、脉冲强度以及周期性都可以不同, 其模型如图 12 所示.

图 12 是准周期随机脉冲序列船舶辐射噪声模型, 即某时间段船舶辐射噪声由 $(N + 1)$ 个脉冲簇组成, 每个脉冲簇由 $(M + 1)$ 个脉冲组成, 信号时长为 $(N + 1)T$, T 为脉冲(或脉冲簇)出现时刻的平均时间间隔, 表征了船舶工作中的周期性成分; 图中 ξ 表示脉冲强度, t_{nf} 为脉冲的出现时刻, t_{nb} 为脉冲的结束时刻, Δ 为脉冲出现时刻的随机摆幅.

从图 12 中可以得到每个脉冲出现时刻的数学表达式为

$$t_{nf} = nT + \Delta_{mn}. \quad (3)$$

船舶辐射噪声时域信号根据图 12 可表示为

$$S(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \xi_{mn} p(t - nT - \Delta_{mn}). \quad (4)$$

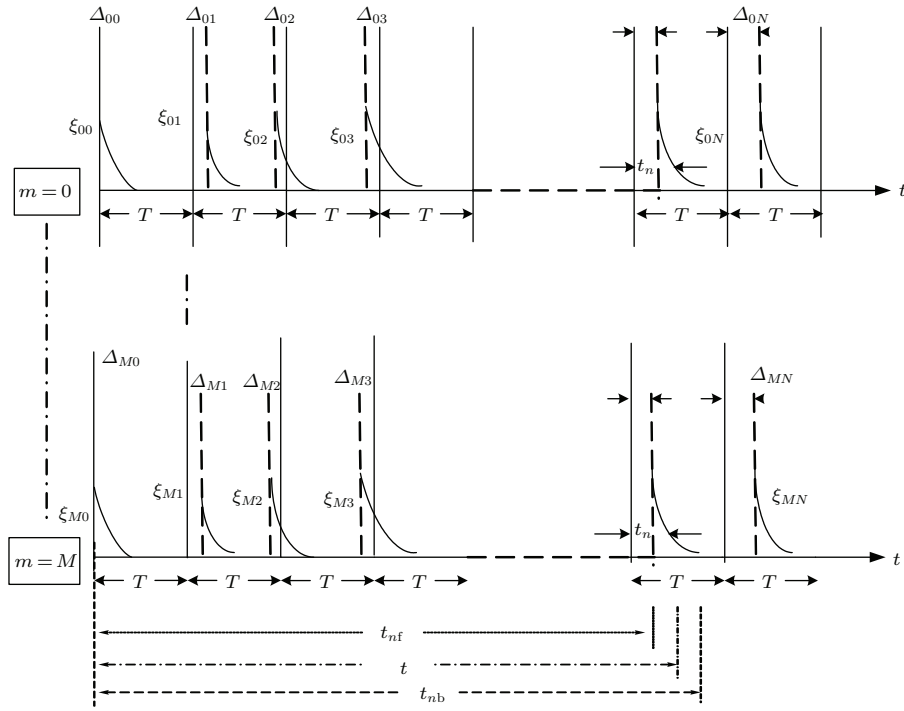


图 12 准周期随机声脉冲序列船舶噪声模型

Fig. 12. Quasi-periodic random sound pulse sequence signal.

(4) 式中 $p(t)$ 为强度为 1 的单脉冲表达式, 则其傅氏变换可以表示为

$$f_p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

根据 (5) 式, (4) 式的傅氏变换可表示为

$$\begin{aligned} F_S(\omega) &= FFT(S(t)) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \xi_{mn} p(t - nT - \Delta_{mn}) \right] e^{-j\omega t} dt \\ &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \xi_{mn} f_p(\omega) e^{-j\omega(nT + \Delta_{mn})}. \end{aligned} \quad (6)$$

由 (6) 式可以得到该模型噪声平均功率谱为

$$\begin{aligned} FF(\omega) &= E \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{(N+1)T} |F_S(\omega)|^2 \right) \right] \\ &= E \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{(N+1)T} \left| \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \xi_{mn} f_p(\omega) e^{-j\omega(nT + \Delta_{mn})} \right|^2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

设

$$Z_n(\omega) = \sum_{m=0}^M \xi_{mn} e^{-j\omega(nT + \Delta_{mn})}, \quad (8)$$

将 (8) 式代入 (7) 式可得

$$FF(\omega)$$

$$= \frac{|f_p(\omega)|^2}{T} \cdot E \left(\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left| \sum_{n=0}^N Z_n(\omega) \right|^2 \right). \quad (9)$$

(9) 式中 $E(\cdot)$ 为系综平均, 设

$$Z(\omega) = E \left(\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left| \sum_{n=0}^N Z_n(\omega) \right|^2 \right), \quad (10)$$

计算 (10) 式得

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= E \left(\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left| \sum_{n=0}^N Z_n(\omega) \right|^2 \right) \\ &= E \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left(\sum_{n=0}^N |Z_n(\omega)|^2 + \sum_{i_1=0}^N \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^N Z_{i_1}(\omega) Z_{i_2}^*(\omega) \right) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式中, $Z_{i_2}^*$ 表示为 Z 的复共轭.

将 (8) 式代入 (11) 式中小括号第一项得

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N |Z_n(\omega)|^2 &= \sum_{n=0}^N Z_n(\omega) Z_n^*(\omega) \\ &= \sum_{n=0}^N \left| \sum_{m=0}^M \xi_{mn} e^{-j\omega(nT + \Delta_{mn})} \right|^2 \\ &= \sum_{n=0}^N \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mn}^2 + \sum_{i_1=0}^M \sum_{i_2=0}^M \xi_{i_1 n} \xi_{i_2 n} \right) \end{aligned}$$

$$\times e^{j\omega(\Delta_{i_2n}-\Delta_{i_1n})} \quad (i_1 \neq i_2), \quad (12)$$

将(8)式代入(11)式中小括号中第二项得

$$\begin{aligned} & \sum_{i_1=0}^N \sum_{\substack{i_2=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N Z_{i_1}(\omega) Z_{i_2}^*(\omega) \\ &= \sum_{i_1=0}^N \sum_{\substack{i_2=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N \left[\left(\sum_{m=0}^M \xi_{mi_1} e^{-j\omega(i_1T+\Delta_{mi_1})} \right) \right. \\ & \quad \left. \times \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mi_2} e^{-j\omega(i_2T+\Delta_{mi_2})} \right)^* \right], \quad (13) \end{aligned}$$

(13)式中方括号共轭相乘结果为

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mi_1} e^{-j\omega(i_1T+\Delta_{mi_1})} \right) \\ & \quad \times \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mi_2} e^{-j\omega(i_2T+\Delta_{mi_2})} \right)^* \\ &= e^{j\omega(i_2-i_1)T} \cdot \sum_{i_3=0}^M \sum_{i_4=0}^M \xi_{i_3i_1} \xi_{i_4i_2} \\ & \quad \times e^{j\omega(\Delta_{i_3i_2}-\Delta_{i_4i_1})}. \quad (14) \end{aligned}$$

设

$$\begin{aligned} G_{i_1i_2}(\omega) &= e^{j\omega(i_2-i_1)T} \cdot \sum_{i_3=0}^M \sum_{i_4=0}^M \xi_{i_3i_1} \xi_{i_4i_2} \\ & \quad \times e^{j\omega(\Delta_{i_3i_2}-\Delta_{i_4i_1})}, \quad (15) \end{aligned}$$

则(11)式可变为

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= E \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left(\sum_{n=0}^N \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mn}^2 \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \sum_{i_1=0}^M \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^M \xi_{i_1n} \xi_{i_2n} e^{j\omega(\Delta_{i_2n}-\Delta_{i_1n})} \right) \right. \\ & \quad \left. \left. + \sum_{i_1=0}^N \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^N G_{i_1i_2}(\omega) \right) \right]. \quad (16) \end{aligned}$$

由(16)式可得

$$\begin{aligned} & Z(\omega) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left\{ (N+1) \left[E \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mn}^2 \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \sum_{i_1=0}^M \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^M \xi_{i_1n} \xi_{i_2n} e^{j\omega(\Delta_{i_2n}-\Delta_{i_1n})} \right) \right] \right\} \\ & \quad + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \left\{ \sum_{i_1=0}^N \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^N \left[e^{j\omega(i_2-i_1)T} \right. \right. \end{aligned}$$

$$\left. \left. \times E \left(\sum_{i_3=0}^M \sum_{i_4=0}^M \xi_{i_3i_1} \xi_{i_4i_2} e^{j\omega(\Delta_{i_3i_2}-\Delta_{i_4i_1})} \right) \right] \right\}, \quad (17)$$

设

$$\begin{aligned} K_{m\Delta}(\omega) &= E \left(\sum_{m=0}^M \xi_{mn}^2 + \sum_{i_1=0}^M \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^M \xi_{i_1n} \xi_{i_2n} \right. \\ & \quad \left. \times e^{j\omega(\Delta_{i_2n}-\Delta_{i_1n})} \right), \quad (18) \end{aligned}$$

$$\Theta_{m\Delta}(\omega) = E \left(\sum_{i_3=0}^M \sum_{i_4=0}^M \xi_{i_3i_1} \xi_{i_4i_2} e^{j\omega(\Delta_{i_3i_2}-\Delta_{i_4i_1})} \right), \quad (19)$$

将(18)式和(19)式代入(17)式中, 得到

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= K_{m\Delta}(\omega) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{i_1=0}^N \\ & \quad \times \sum_{i_2=0, i_1 \neq i_2}^N [e^{j\omega(i_2-i_1)T} \cdot \Theta_{m\Delta}(\omega)] \\ &= K_{m\Delta}(\omega) + \Theta_{m\Delta}(\omega) \\ & \quad \times \frac{2\pi}{T} \sum_{n=1}^N \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right), \quad (20) \end{aligned}$$

根据(20)式, 则得到该模型的功率谱公式为

$$\begin{aligned} FF(\omega) &= \frac{|f_p(\omega)|^2}{T} \cdot \left[K_{m\Delta}(\omega) + \Theta_{m\Delta}(\omega) \right. \\ & \quad \left. \times \frac{2\pi}{T} \sum_{n=1}^N \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right) \right]. \quad (21) \end{aligned}$$

由(21)式可知, 方括号前一项代表连续谱, 方括号后一项代表线谱, 由(19)式可知, 当 Δ 扰动较小时, $\Theta_{m\Delta}(\omega)$ 在低频满足随频率缓慢减小的趋势, 这也是谐频线谱随频率升高而缓慢减小的物理含义, 当 Δ 扰动较大时, $\Theta_{m\Delta}(\omega)$ 趋近于零, 线谱消失. 从(21)式中可以看到, 功率谱中的连续谱受到脉冲功率谱的调制(即(21)式中的 $|f_p(\omega)|^2$), 它们对功率谱随频率的变化特征起到重要作用. 为了更好地符合船舶水下辐射噪声功率谱中连续谱的变化规律, 本文提出将具有爆炸信号形状^[29,30]的脉冲作为组成船舶水下辐射噪声的基本单元, 即

$$P = \begin{cases} e^{-\gamma t} \cos(\omega_0 t), & t \geq 0 \\ -e^{-\gamma t}, & t < 0 \end{cases} \quad (\gamma > 0), \quad (22)$$

(22)式的傅里叶变换为

$$FFT(P) = \int_0^\infty (e^{-\gamma t} \cos(\omega_0 t)) e^{-j\omega t} dt$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{-\infty}^0 -e^{\gamma t} e^{-j\omega t} dt \\
 & = \frac{\gamma + j\omega}{(\gamma + j\omega)^2 + \omega_0^2} - \frac{1}{\gamma - j\omega}, \quad (23)
 \end{aligned}$$

由(23)式得到

$$\begin{aligned}
 & |FFT(P)|^2 \\
 & = \frac{(2\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}{\gamma^2(\gamma^2 + \omega^2 + \omega_0^2)^2 + \omega^2(\gamma^2 + \omega^2 - \omega_0^2)^2}, \quad (24)
 \end{aligned}$$

当 ω_0 较小时, (24)式可简化为

$$\begin{aligned}
 |FFT(P)|^2 & = \frac{(2\omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}{\gamma^2(\gamma^2 + \omega^2)^2 + \omega^2(\gamma^2 + \omega^2)^2} \\
 & = \frac{4\omega^2}{(\gamma^2 + \omega^2)^2}, \quad (25)
 \end{aligned}$$

对(25)式求导可得

$$\frac{\partial |FFF(P)|^2}{\partial \omega} = \frac{8\omega(\gamma^2 - \omega^2)}{(\gamma^2 + \omega^2)^3}. \quad (26)$$

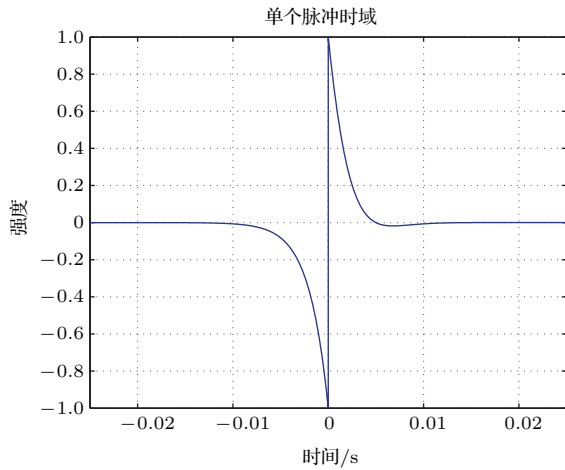


图 13 爆炸型余弦脉冲时域 ($\gamma = 500, \omega_0 = 50 \cdot 2\pi$)

Fig. 13. Explosive cosine pulse signal.

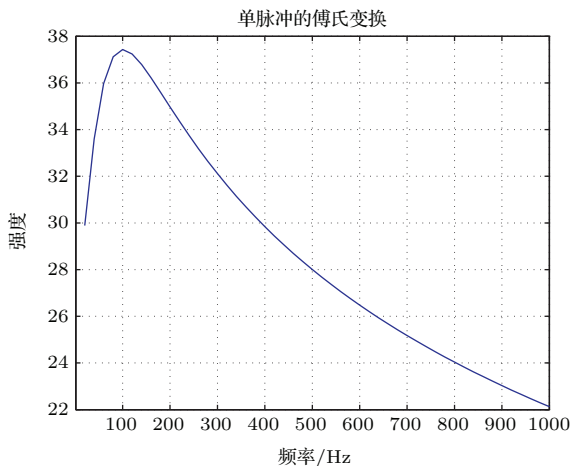


图 14 爆炸型余弦脉冲功率谱

Fig. 14. The power spectrum of the pulse.

由(26)式可知, 当 $\gamma = \omega$ 时, 式子取得最大值, $\omega < \gamma$ 时, 功率谱中连续谱强度随频率的增加而增长, $\omega > \gamma$ 时, 功率谱中连续谱强度随频率的增加而减小, γ 值的大小对功率谱峰的位置具有重要影响.

图 13 为爆炸型余弦单脉冲时域波形 (ω_0 较小时), 图 14 是爆炸型余弦单脉冲的功率谱, 功率谱具有谱峰. 从(26)式以及图 14 可以看到, 当 ω_0 较小时, 爆炸型衰减余弦单脉冲的功率谱变化趋势是符合船舶辐射噪声功率谱的.

3.2 模型仿真与实验数据的对比

根据以上理论分析和数学推导, 本节将以图 13 中所示爆炸型衰减余弦脉冲为基础, 进行船舶辐射噪声仿真, 仿真流程如图 15 所示.

图 15 (a) 为本文仿真船舶水下辐射噪声信号的生成流程图. 采用适合的采样频率, 根据实际情况确定脉冲簇的平均周期, 然后随机产生 N 个满足高斯分布的变量; 产生 N 组脉冲簇, 每一个脉冲簇由 M 个单元脉冲组成, 其时刻摆幅满足瑞利分布, 其均值分别对应已生成的高斯分布的 N 个变量; 将 N 组脉冲簇按时间出现时刻排序, 即生成仿真船舶辐射噪声, 最后进行相应的功率谱分析.

生成的仿真船舶辐射噪声信号, 其时域平均功率以及其功率谱形状、连续谱谱峰频率和谱级、低频线谱级相对于连续谱的幅度, 均可通过调节准周期随机脉冲序列(含单元脉冲)的参数, 使之和实测船舶噪声功率谱相符, 即其时域平均功率和实测功率谱频域和相等或相近, 二者形状一致或符合, 线谱级相对幅度基本相等, 线谱频率位置相同, 连续谱谱峰频率相同或相近, 谱峰级相近. 图 15 (b) 给出了具体的调节过程.

通过改变脉冲簇周期 (T)、脉冲簇周期摆幅标准方差 (σ_Δ) 以及单元脉冲参数 (γ, ω_0, ξ_a) 来调制船舶辐射噪声的功率谱特性, 而图 16 是仿真功率谱与实际接收船舶辐射噪声功率谱(图 3 所示集装箱船)的对比.

为了减小实验接收到的船舶水下辐射噪声受环境噪声以及波导影响, 特别选取图 3 的功率谱进行仿真对比. 如图 3 所示, 船舶水下辐射噪声功率谱是一艘集装箱船辐射噪声数据, 该船长 366 m, 宽 52 m, 吃水 12.9 m, 航速 20.3 节, 距离水听器最近距离大约 53 m, 是大量实验数据中距离水听器最近的, 航速较高, 其受波导调制以及环境噪声的影响(300 Hz 以下)比较小, 适合仿真对比.

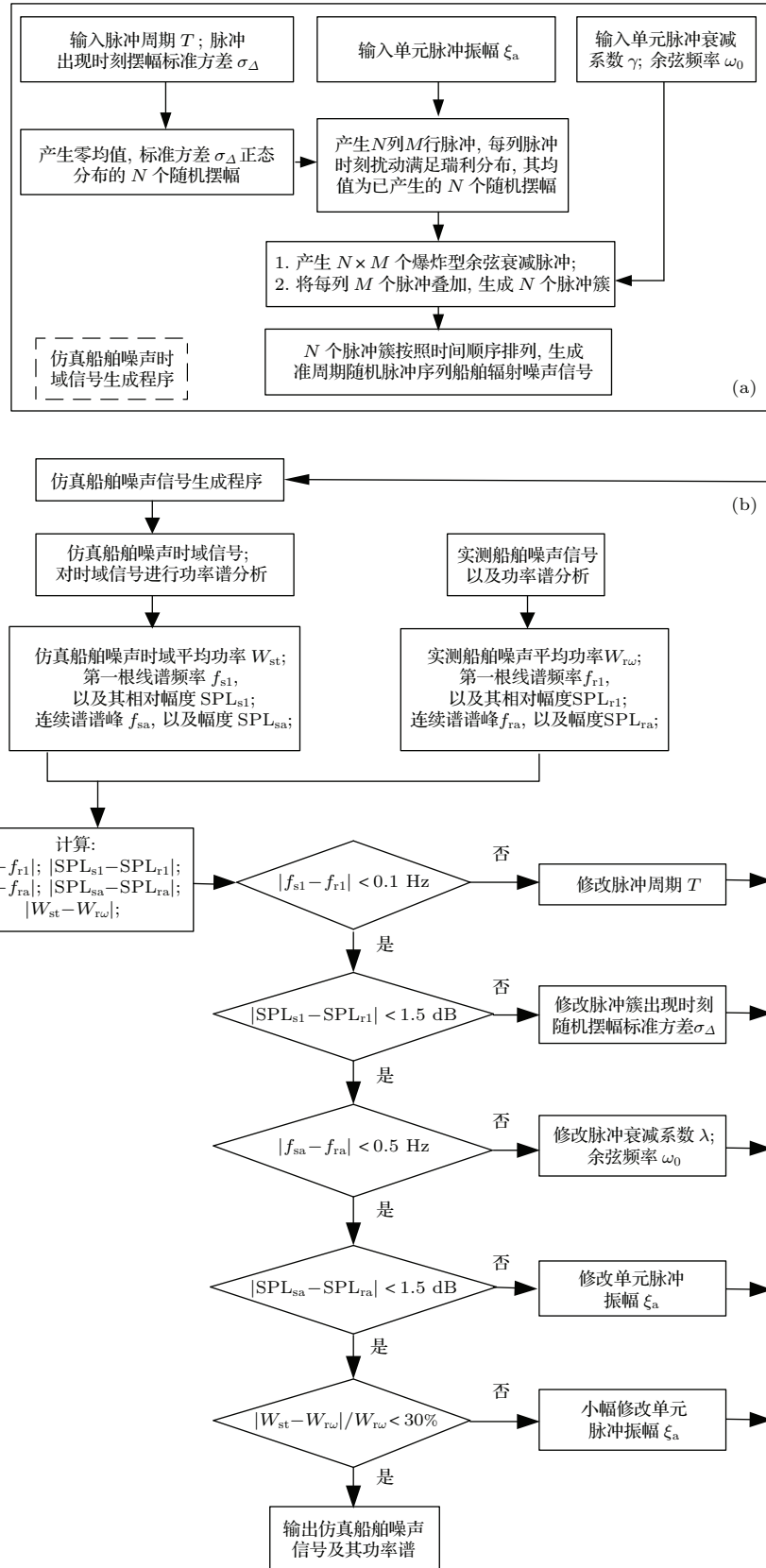


图 15 (a) 仿真船舶辐射噪声信号生成流程图; (b) 仿真与实测船舶辐射噪声信号对比流程图

Fig. 15. (a) Simulation process of ship radiated noise; (b) simulation comparing process of ship radiated noise.

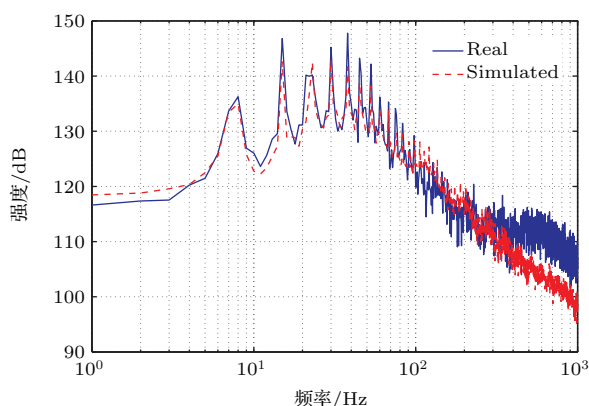


图 16 (网刊彩色) 船舶仿真功率谱与实际船舶辐射噪声功率谱的对比图

Fig. 16. (color online) The comparison of the power spectrum between ship radiated noise and actual ship radiated noise.

图 16 中蓝色实线是接收到的实验数据的功率谱, 红色点线是仿真功率谱. 仿真船舶噪声所采用的参数为 $T = 7.56$ s, 周期摆幅标准差为 $\sigma_{\Delta} = 0.003$, 单元脉冲的 $\gamma = 100$, $\omega_0 = 10 \cdot 2\pi$. 从图 16 可以看到, 在 300 Hz 以下频段连续谱以及线谱的仿真与实际数据符合得非常好, 在 300 Hz 以上频段可能受环境噪声的影响存在一定误差. 从仿真结果来看, 采用爆炸型衰减余弦脉冲作为基础单元的准周期随机声脉冲序列模型仿真船舶水下辐射噪声更接近实际船舶噪声, 可行有效.

4 结 论

基于准周期随机声脉冲序列模型, 将船舶水下辐射噪声表示为一系列形状相似、出现时刻间隔具有微小扰动的准周期时序脉冲信号, 本文通过理论分析和数学推导表明, 该模型可以很好解释船舶辐射噪声“节奏”感, 表现为功率谱中的线谱, 脉冲出现时间间隔的微小扰动, 是谐频线谱随频率升高其相对强度逐渐降低的根本原因. 该模型对船舶机械噪声(电刷、活塞等周期性冲击运动)、螺旋桨噪声(无空泡桨声辐射和较高航速螺旋桨空泡周期性破碎)等都有很好的适应性. 某近海获得的 4 种(5 条)典型船舶水下辐射噪声实验数据的分析结果证明该模型作为船舶辐射噪声模型的合理性, 在此基础上, 引入爆炸型衰减余弦脉冲, 作为仿真采用的单元脉冲, 以代替指数衰减型单元脉冲进一步完善了该模型. 通过与实际船舶水下噪声功率谱数据对比发现, 该单元脉冲可以产生谱峰位置随船舶航速移动的功率谱, 很好地符合了实际船舶水下辐射噪声

功率谱的变化特征, 具有实际应用价值.

在实际测量以及应用中, 船舶水下辐射噪声往往要受到海洋环境以及海洋环境噪声的影响, 研究海洋波导以及海洋环境噪声影响的船舶辐射噪声, 将是下一步的研究方向.

参考文献

- [1] Knudsen V O, Alford R S, Emling J W 1944 *Natl. Def. Res. Comm. Rep.* pp1-246
- [2] Wenz G M 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1936
- [3] Ross D 1976 *Mechanics of Underwater Noise* (New York: Pergamon) pp272-287
- [4] Paul S, Richard M H 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 691
- [5] Paul T A, David J V 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 118
- [6] Li X G, Feng X X, Ge Y 2002 *Acta Acustica* **27** 443 (in Chinese) [李训浩, 冯欣欣, 戈弋 2002 声学学报 **27** 443]
- [7] Tong F, Lu J R, Fang S L 2004 *Acta Acustica* **29** 398 (in Chinese) [童峰, 陆佳人, 方世良 2004 声学学报 **29** 398]
- [8] Shi G J, Hu J C 2007 *Acta Acustica* **32** 19 (in Chinese) [史广智, 胡均川 2007 声学学报 **32** 19]
- [9] Li Q H, Li M, Yang X T 2008 *Acta Acustica* **33** 193 (in Chinese) [李启虎, 李敏, 杨秀庭 2008 声学学报 **33** 193]
- [10] Rex K A, Bruce M H, James A M 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **129** 642
- [11] Wu G Q, Wang G M, Chen Y M 2012 *Acta Acustica* **37** 432 (in Chinese) [吴国清, 王美刚, 陈耀明 2012 声学学报 **37** 432]
- [12] Cheng Y S, Zhang B H, Gao X, Zhou J 2012 *Acta Acustica* **37** 25 (in Chinese) [程玉胜, 张宝华, 高鑫, 周静 2012 声学学报 **37** 25]
- [13] Megan F M, Donald R, Sean M W, John A H 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 92
- [14] Jennifer L M, David L B, Xiaoyue M N 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 3464
- [15] Jiang G J, Lin J H, Sun J P, Gao X, Yi X J, Jiang P F, Jiang D G 2015 *Acta Acustica* **40** 170 (in Chinese) [蒋国健, 林建恒, 孙军平, 高鑫, 衣雪娟, 江鹏飞, 蒋东阁 2015 声学学报 **40** 170]
- [16] Jiang G J 1982 *The 3rd National Conference on Acoustics* Shanghai, China, June 17-22, 1982 p50
- [17] Wu G Q 1982 *Acta Acustica* **7** 222 (in Chinese) [吴国清 1982 声学学报 **7** 222]
- [18] Tao D C 1983 *Acta Acustica* **8** 65 (in Chinese) [陶笃纯 1983 声学学报 **8** 65]
- [19] Jiang G J, Lin J H, Ma J, Zhao J P 1998 *Acta Acustica* **23** 401 (in Chinese) [蒋国健, 林建恒, 马杰, 赵建平 1998 声学学报 **23** 401]
- [20] Xing G Q 2005 *M.S. Dissertation* (Xian: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [邢国强 2005 硕士学位论文(西安: 西北工业大学)]
- [21] Zhang J, Yang Z C, Tao W 2015 *Audio Engineering* **39** 69 (in Chinese) [张军, 扬子晨, 陶伟 2015 电声技术 **39** 69]
- [22] Shi G Z, Hu J C 2006 *Journal of System Simulation* **18** 1398 (in Chinese) [史广智, 胡均川 2006 系统仿真学报 **18** 1398]

- [23] Luo J, Zhan Y Q, Ma D K 2008 *Applied Acoustics* **27** 108 (in Chinese) [罗建, 湛雅倩, 马定坤 2008 应用声学 **27** 108]
- [24] Li Q, Yan B C, Zhang W J 2010 *Ship Science and Technology* **32** 121 (in Chinese) [李琴, 苑秉成, 张文娟 2010 船舶科学技术 **32** 121]
- [25] Zhu Y, Hu S G, Chen G 2010 *System Simulation Technology and Application* **11** 591 (in Chinese) [朱艳, 胡生国, 陈刚 2010 系统仿真技术及其应用 **11** 591]
- [26] Xie J, Da L L, Hu J C 2011 *Technical Acoustics* **30** 364 (in Chinese) [谢骏, 笄良龙, 胡均川 2011 声学技术 **30** 364]
- [27] Xie J, Da L L, Tang S 2013 *Acta Armanmentarii* **34** 294 (in Chinese) [谢骏, 笄良龙, 唐帅 2013 兵工学报 **34** 294]
- [28] Sun J P, Jiang G J, Lin J H 2014 *Technical Acoustics* **33** 113 (in Chinese) [孙军平, 蒋国健, 林建恒 2014 声学技术 **33** 113]
- [29] Zhang Y, Li F H, Li Z L, Zhang R H 2008 *Technical Acoustics* **27** 120 (in Chinese) [张岩, 李风华, 李整林, 张仁和 2008 声学技术 **27** 120]
- [30] Xiao Y B, Chen H Z, Zheng Y, Hu X F 2009 *Ocean Technology* **28** 58 (in Chinese) [肖勇兵, 陈鸿志, 郑耀, 胡晓峰 2009 海洋技术 **28** 58]

Theoretical model and simulation of ship underwater radiated noise*

Sun Jun-Ping¹⁾⁴⁾ Yang Jun²⁾ Lin Jian-Heng^{1)3)†} Jiang Guo-Jian¹⁾
Yi Xue-Juan¹⁾ Jiang Peng-Fei¹⁾

1) (Qingdao Branch, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266023, China)

2) (Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

4) (University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Information Engineering), Beijing 100049, China)

(Received 25 November 2015; revised manuscript received 1 April 2016)

Abstract

Ship underwater radiated noise is one of the most important ocean ambient noise sources, and building a reasonable model for the ship underwater radiated noise is helpful for understanding the physical mechanism and reducing research cost of ship underwater radiated noise. The quasi-periodic random sound pulse sequence signals act well in explaining the rhythm and the power spectrum variation of the ship underwater radiated noise, and reveal that there are not any real sinusoidal components in ship radiated noise signals, which come from the non-linear transformation of the signals, and the analysis of some representative experimental data of ship radiated noise also supports this idea. Based on this, the explosion-type cosine pulses are used as the units of quasi-periodic random sound pulse sequences. This model can generate the power spectrum with a peak, and the peak location can change with ship velocity or ship type. The power spectrum variation characteristics of quasi-periodic random sound pulse sequences consisting of the explosion-type cosine pulses are in good agreement with the measured ship underwater radiated noise data, which shows that this model is of important practical value.

Keywords: experimental data, quasi-periodic random sound pulse sequence, explosive cosine pulse signal

PACS: 43.30.Nb, 43.30.Jx, 43.60.Hj, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.65.124301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174314, 11204345, 11474301) and State Key Laboratory of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. SKLA201502).

† Corresponding author. E-mail: linjh@mail.ioa.ac.cn