



论 文

加速螺旋桨水声信号建模及其特性分析

冯源, 陶然*, 王越

北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: rantao@bit.edu.cn

收稿日期: 2009-12-29; 接受日期: 2010-04-01

摘要 加速或减速旋转螺旋桨的水声信号特征可用于被动探测与分类离靠港船只或水下航行器. 文中从阐述螺旋桨匀加速旋转时尾流速度周向变化所具有的 chirp 周期特性出发, 提出匀加速螺旋桨空化噪声的幅度调制包络可通过脉冲间幅度起伏的 chirp 周期高斯脉冲串信号予以建模, 并给出了该模型的时域表达式. 文中分析了 chirp 周期信号的简化分数阶 Fourier 变换谱特性, 得到了在一定条件下 chirp 周期信号与其谐波系数间的关系式. 文中通过水洞试验数据分析与仿真数据分析的比较, 验证了匀加速螺旋桨噪声调制包络信号模型的合理性.

关键词 加速螺旋桨 水声信号建模 chirp 周期信号 简化分数阶 Fourier 变换

1 引言

自冷战结束后, 西方各国海军的主要作战部署由深海向浅海转移. 由于港口水域的安全对于沿海国家或地区的经济、政治及军事上具有重要的意义, 因此港口水域的攻防成为了各国关注的重点. 从而用于港口水域安全防御、军事封锁及商业管理的水声监测系统受到了普遍的关注^[1-6].

探测及分类离靠港的运动船只或水下航行器, 对于港口水域水声监测系统具有重要的民用及军用价值^[4]. 众多的离靠港船只均会经历一个加速或减速的过程. 在这些的过程中, 尽管船只的巨大惯性导致船速变化缓慢, 但船舶螺旋桨的旋转速度在短时间内可发生较大改变, 且出于船舶动力系统安全性等方面的考虑, 船舶通常以换挡的方式均匀提高或降低螺旋桨转速, 因此在一段时间内转速往往具有近似固定的加速度. 并且, 螺旋桨的加速度与船舶类别有着特定的联系, 例如大型的船舶虽有较大的螺旋桨, 但其旋转时的加速度却相对较小. 蕴含了螺旋桨加速度信息的螺旋桨噪声信号是被动水声监测系统的主要信号源, 因此从中提取螺旋桨加速度的水声信号特征是探测、分类离靠港目标更有效的途径. 在国内外现有的文献中, 对螺旋桨噪声信号特性^[7,8]、建模方法^[9,10]及信号特征提取方法^[11-13]进行了诸多研究, 但这些研究均是基于螺旋桨匀速旋转的前提, 而对于螺旋桨处于加减速状态下的水声信号特性鲜有涉及.

因此, 本文针对匀加速螺旋桨噪声的信号特性进行了理论与试验研究. 首先分析了在匀加速情况下螺旋空化噪声周向起伏的变化规律. 进而运用脉冲间幅度起伏的 chirp 周期高斯脉冲串信号对匀加速螺旋桨噪声幅度调制包络进行仿真建模, 并推导了包络信号的时域表达式. 基于该包络信号模型,

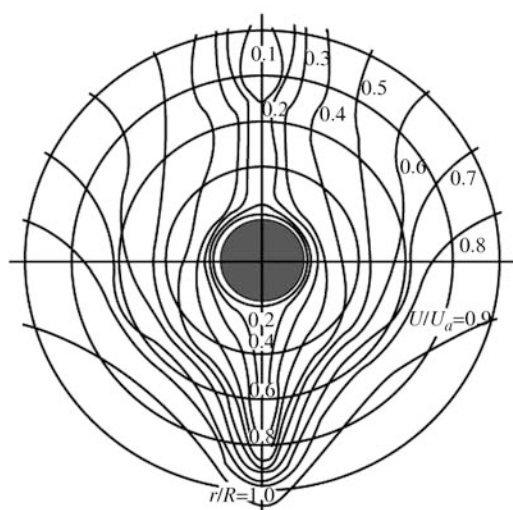


图 1 典型单桨商船尾流周向等速线图

Figure 1 Wake Diagram for single-screw merchant ship

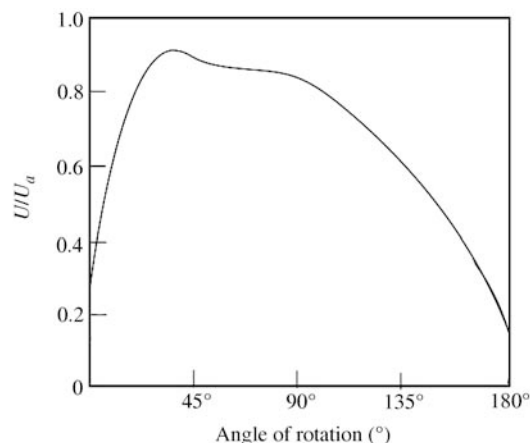
图 2 相对速度 U/U_a 与旋转角度的关系

Figure 2 The variation of relative velocity with the angle

通过分析 chirp 谐波在分数阶域的相互影响, 推导得到了被动水声探测条件下 chirp 周期信号与其谐波系数间的近似关系式. 为了验证数学模型和理论分析的合理性, 文中对比了匀加速螺旋桨噪声仿真分析结果与水洞试验数据的分析结果, 并在最后阐述了结论. 本文的研究成果, 可为新型的被动水声探测系统的信号处理方法研究提供了理论依据.

2 匀加速螺旋桨噪声起伏规律分析

2.1 螺旋桨空化噪声起伏的成因

螺旋桨作为船舶的推进器, 在海水中不断高速转动, 叶尖速度常达每秒数十米. 这种高速转动, 在海水中造成了明显的局部压力下降, 结果在桨叶的叶尖、叶面甚至根部往往发生强烈的空化^[7,8], 空化产生的辐射噪声是被动声纳的主要信号源. 螺旋桨在船舶的尾流中工作, 由于船体线型及附体并非中心对称, 所以在螺旋桨平面内, 尾流速度具有明显的周向不均匀性^[7], 可用如图 1 所示的尾流等速线图表示. 图 1 中 U 是尾流速度, U_a 是船舶的前进速度, 可见桨叶旋转一周, U/U_a 经历从小到大再变小的变化规律, 图 2 为叶尖位置相对速度 U/U_a 与旋转角度的关系曲线^[10]. 当螺旋桨匀速转动时, 在每片桨叶的回转周期中, 相对来流攻角周期性变化, 从而桨叶的空化激烈程度也发生相应的周期变化^[9-11].

2.2 匀加速螺旋桨空化噪声的起伏规律

对于匀速旋转的螺旋桨, 其尾流速度的变化是周期的, 可按 Fourier 级数展开写成

$$W(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k2\pi f_s t + \theta_k) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\varphi_s(t) + \theta_k), \quad (1)$$

其中 f_s 为螺旋桨轴频, a_k 为 Fourier 系数, θ_k 为 k 次谐波的起始相位, $\varphi_s(t) = k2\pi f_s t$ 是桨叶旋转引起的相位改变. 当船舶螺旋桨加速时, 可以认为转速是线性增加的, 则 t 时刻的轴频为

$$f(t) = f_0 + \mu_0 t, \quad (2)$$

其中 f_0 为起始轴频, μ_0 为轴频的加速度. 因此, t 时刻旋转引起的相位改变为

$$\varphi(t) = \int_0^t 2\pi f(t) dt = 2\pi f_0 t + \pi \mu_0 t^2. \quad (3)$$

无论处于匀速还是加速的状态, 桨叶都经过相同的周向非定常尾流场. 若以相位作为变量考虑, 则相对于桨叶的尾流速度依然是以 2π 为周期变化, 而两种状态的区别仅在于相位与时间的映射关系的不同. 因此, 将 (1) 式中相位与时间的映射关系 $\varphi_s(t)$ 替换成 $\varphi(t)$, 即可得到匀加速时尾流速度相对于桨叶的变化规律:

$$W_a(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k(2\pi f_0 t + \pi \mu_0 t^2) + \theta_k). \quad (4)$$

此时尾流速度的变化规律是一个 chirp 周期信号. 该信号是由 Marián 和 Luis^[14,15] 提出的, 用于描述小段哺乳动物发音特征的信号, 其定义是: 基频随时间线性变化, 并由多个 chirp 谐波加权合成的实信号. 其中, chirp 谐波是指起始频率和调频率均与基频分量成倍数关系的一组 chirp 信号. 且从 (4) 式中可以看出, 此时 chirp 谐波的权值 (即 chirp 谐波系数) 与基频 $f_s = f_0$ 的周期信号的 Fourier 系数相等. chirp 周期信号相位每变化 2π 的时间间隔称为一个 chirp 周期, chirp 周期信号的相位变化规律称为 chirp 周期性.

尾流速度周向变化的 chirp 周期性和不断增大的旋转速度, 导致桨叶相对来流速度和相对来流攻角的周向变化规律也产生相应的改变. 图 3 所示为螺旋桨加速时任意半径 r 处的来流速度矢量合成示意图, 其中 $2\pi r f(t)$ 是旋转速度, ω_i 是诱导速度, β 是螺距角, $V(t)$ 是随时间变化的相对来流速度, 是旋转速度、前进速度及诱导速度矢量和, $\alpha(t)$ 为随时间变化的来流攻角. 由于船舶具有较大的惯性, 因而可认为在相对较短的螺旋桨加速时段中, 船舶前进速度 U_a 保持不变. 诱导速度分量通常较小且与合成速度垂直, 所以计算时可不必考虑诱导速度 ω_i 的影响^[7]. 因此相对来流攻角和垂直于螺旋桨叶面的相对来流速度大小分别为

$$\begin{cases} \alpha(t) = \beta - \arctan \frac{U_a W_a(t)}{2\pi r f(t)}, \\ V_u(t) = \sqrt{U_a^2 W_a^2(t) + (2\pi r f(t))^2} \cdot \sin \alpha(t). \end{cases} \quad (5)$$

取 $f_0 = 3$ Hz, $\mu_0 = 1$ Hz, $\beta = 15^\circ$, $r = 0.5$ m, $U_a = 2$ m/s, 可以得到如图 4 所示的尾流速度、来流攻角及垂直于叶面的相对来流速度随时间变化的示意图. 从图 4 中可以看到, 半径 r 处的来流攻角呈现近似 chirp 周期变化的特点, 垂直于螺旋桨叶面的相对来流速度大小呈现幅度增大的 chirp 周期变化规律. 对于桨叶上的其他叶元而言, 来流攻角和相对来流速度也具有相同的 chirp 周期性. 因此, 桨叶上空化的剧烈程度随着相对来流速度的变化而不断增大且周向脉动. 每片桨叶上产生的宽带空化噪声声压的起伏也具有与相对来流速度相同的变化规律, 即可以用幅度逐步增大的 chirp 周期信号描述.

3 匀加速螺旋桨噪声调制包络的时域表达式

文献 [10] 中根据对实船螺旋桨噪声数据的分析结果, 认为螺旋桨匀速旋转时空化噪声调制包络是

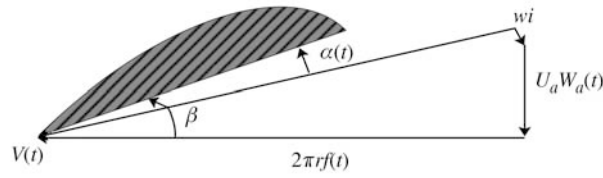


图 3 相对来流速度矢量合成示意图

Figure 3 Inflow velocity diagrams

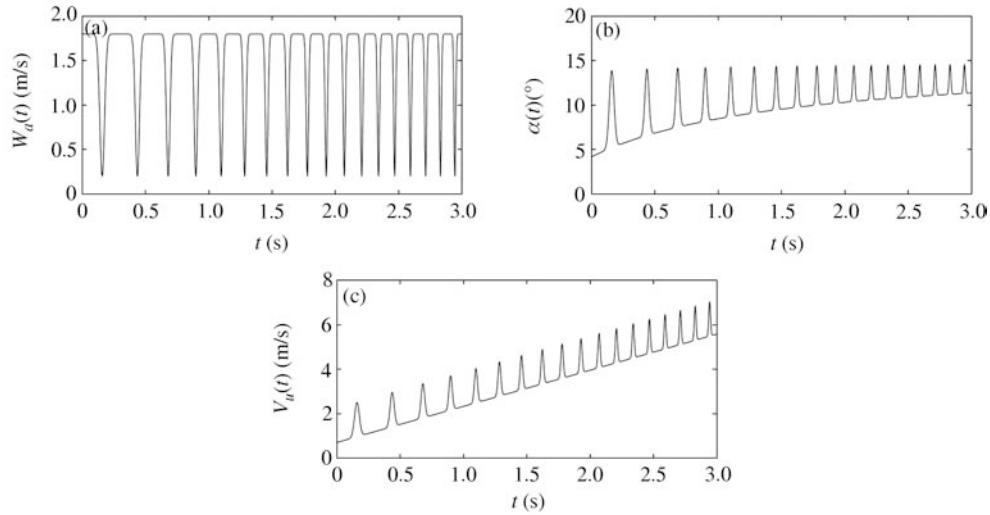


图 4 桨叶加速旋转时半径 \$r\$ 处尾流速度及相对来流速度变化规律

Figure 4 The diagram of \$W_a(t)\$, \$\alpha(t)\$ and \$V_u(t)\$ for the accelerating propeller

(a) \$W_a(t)\$; (b) \$\alpha(t)\$; (c) \$V_u(t)\$

有相同形状、相等重复周期、幅度随机并具有成组结构的脉冲性随机过程, 单个脉冲可近似地抽象为高斯形:

$$u_{\xi}(t) = \xi \exp[-(t - T/2)^2 / 2\sigma^2], 0 \leq t < T. \quad (6)$$

式中 \$\sigma = T/(B \cdot C)\$, \$T = 1/f_s\$ 为高斯脉冲持续时间, \$B\$ 为叶片数, \$C\$ 为由桨叶特征及环境参数等决定的常数. 对于不同的高斯形脉冲, \$\xi\$ 是相互独立的随机变量, 服从 \$[\bar{\xi}/2, 3\bar{\xi}/2]\$ 均匀分布, \$\bar{\xi}\$ 为脉冲幅度平均值. 考虑到螺旋桨各叶片间的几何不对称, 它们的空化程度是不均匀的, 取 \$B\$ 个脉冲为一组, 其幅度平均值分别为 \$\bar{\xi}_1, \bar{\xi}_2, \dots, \bar{\xi}_B^{[10]}\$. 螺旋桨匀速旋转一周时, 调制包络信号的相位与时间的映射关系为

$$t_{\varphi_s} = \frac{\varphi_s(t)}{2\pi f_s} = \frac{T\varphi_s(t)}{2\pi}. \quad (7)$$

螺旋桨加速旋转一周时, 如第 1 节所述, 仅相位与时间的映射关系发生改变, 因此用 \$\varphi(t)\$ 代换 \$\varphi_s(t)\$, 可得一个 ‘chirp’ 高斯脉冲的表达式:

$$\begin{aligned} u_{c\xi}(t) &= \xi \exp \left[-\frac{(t_{\varphi} - T/2)^2}{2 \times (T/BC)^2} \right] \\ &= \xi \exp \left[-\frac{B^2 C^2}{2} (f_0 t + \frac{1}{2} \mu_0 t^2 - \frac{1}{2})^2 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

将 chirp 高斯脉冲按 chirp 周期重复, 得到 B 叶匀加速螺旋桨第 i 桨叶空化噪声的 chirp 周期高斯脉冲串调制包络 $e_i(t)$ 的时域表达式为

$$\begin{aligned} e_i(t) &= \xi_{ni}(t)A(t)x_i(t) \\ &= \xi_{ni}(t)A(t)\exp\left[-\frac{B^2C^2}{2}\left(f_0t + \frac{1}{2}\mu_0t^2 - \text{int}(f_0t + \frac{1}{2}\mu_0t^2) - \frac{1}{B}(i-1)\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $x_i(t)$ 为幅度恒定的 chirp 周期信号, $\text{int}()$ 代表取整函数, 表示第 i 个叶片第 n 个 chirp 周期的随机起伏幅度, 也服从 $[\bar{\xi}_i/2, 3\bar{\xi}_i/2]$ 均匀分布, $\bar{\xi}_i$ 为第 i 个叶片脉冲幅度起伏的平均值. $A(t)$ 表示了空化噪声幅度增大的趋势, 是单调递增的函数, 可近似表示为

$$A(t) = P_{\text{ins}}(f(t) - f_I)^\nu, \quad (10)$$

其中 f_I 是螺旋桨空化初生转速, P_{ins} 和 ν 是由螺旋桨的物理参数和外部的环境参数决定的参数, 在螺旋桨加速运动过程中可认为是常数.

由于调制包络是按照 chirp 周期起伏的, 因此需要计算每个 chirp 周期的起止时间, 以获得 (9) 式中 ξ_{ni} 的时域表达式. 考虑到船舶通常以特定的航速 (对应特定的螺旋桨转速) 作为加减速的档位, 因此在仿真建模中, 将起始轴频 f_0 和目的轴频 f_N 作为已知参数是合理的. 同时为了数学表述的简便, 取螺旋桨旋转圈 N 为已知参数. 根据线性调频信号的相位关系和频率关系:

$$\begin{cases} 2\pi\left(f_0T_n + \frac{1}{2}\mu_0T_n^2\right) = 2\pi n, \\ f_n = f_0 + \mu_0T_n. \end{cases} \quad (11)$$

式中 T_n 是螺旋桨旋转 n 圈所用的时间, f_n 是旋转 n 圈后的轴频. 将已知的 f_N 和 N 带入 (11) 式, 可求出加速度 μ_0 及旋转 N 圈后的总时间 T_N (即加速过程的总时间):

$$\begin{cases} T_N = \frac{2N}{f_0 + f_N}, \\ \mu_0 = \frac{f_N - f_0}{T_N} = \frac{f_N^2 - f_0^2}{2N}. \end{cases} \quad (12)$$

将 u_0 代入 (11) 式, 可得 T_n 满足

$$T_n = \frac{2n}{f_0 + (f_0 + \mu_0T_n)}. \quad (13)$$

运用求根公式有

$$T_n = \frac{\sqrt{f_0^2 + 2n\mu_0} - f_0}{\mu_0} = 2N \cdot \frac{\sqrt{(1 - \frac{n}{N})f_0^2 + \frac{n}{N}f_N^2} - f_0}{f_N^2 - f_0^2}. \quad (14)$$

(14) 式表明每个 chirp 周期的起止时间可由已知参数唯一确定, 从而可确定 $\xi_{ni}(t)$ 的表达式

$$\xi_{ni}(t) = \xi_{ni}, T_{n-1} \leq t < T_n. \quad (15)$$

因此根据 (9) 式和 (15) 式, 可以确定匀加速螺旋桨空化噪声调制包络在 $0 - T_n$ 上的时域表达式

$$E(t) = \sum_i e_i(t) = P_{\text{ins}}(f(t) - f_I)^\nu \sum_i \xi_{ni}(t) \exp\left[-\frac{B^2C^2}{2}\left(f_0t + \frac{1}{2}\mu_0t^2 - \text{int}(f_0t + \frac{1}{2}\mu_0t^2) - \frac{i-1}{B}\right)^2\right]. \quad (16)$$

取 $B = 5$, $f_0 = f_s = 3$ Hz, $f_I = 2$ Hz, $f_N = 5$ Hz, $N = 8$, $C = 4$, $P_{\text{ins}} = 2$, $\nu = 0.5$ 可计算得到匀速与匀加速螺旋桨空化噪声包络仿真结果, 分别如图 5(a), (b) 所示.

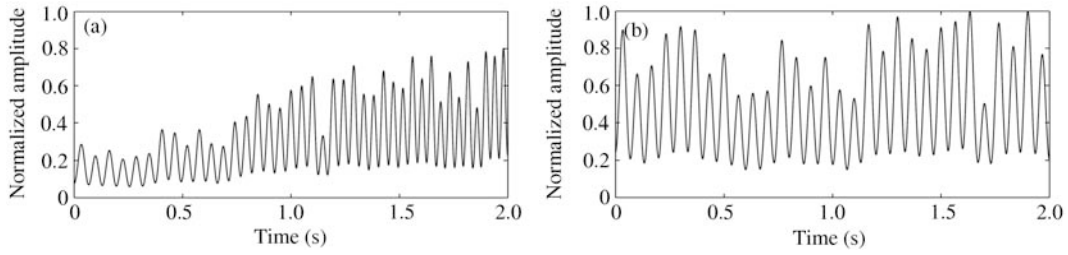


图 5 调制包络仿真结果

Figure 5 The simulation results of modulation envelope

(a) Uniform rotation; (b) constant acceleration

4 chirp 周期信号的特性

匀加速螺旋桨噪声的幅度调制包络由多个 chirp 信号分量加权合成的 chirp 周期信号, 所以为了对螺旋桨噪声信号进行理论分析, 有必要在被动水声探测的应用条件下, 获取其信号特性. 分析多分量 chirp 信号通常采用基于 chirp 分解的方法^[16-18]在某一确定的调频率下对信号进行分解和重构. 然而这些方法均没有考虑到各分量间的谐波关系, 因此本节旨在通过分析 chirp 周期信号的某次谐波在其匹配阶次上的 1 型简化分数阶 Fourier 变换 (simplified fractional Fourier transform, SFRFT)^[16]谱受到其他谐波的影响, 以获取满足一定条件下 chirp 周期信号的特性.

将加速螺旋桨空化噪声调制包络中幅度恒定的 chirp 周期信号部分 $x(t)$ 按指数形式表述如下:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \exp(j2\pi k(f_0 t + \pi \mu_0 t^2)), \quad (17)$$

其中 $f_0 > f_s > 0$, $\mu_0 > 0$. $x(t)$ 的 m 次谐波在 k 次谐波匹配调频率 $k\mu_0$ 上 (即阶次 p 满足 $\cot(p\pi/2) = -2\pi k\mu_0$ 时) 的 SFRFT 谱为

$$X_m^k(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(jm(2\pi f_0 t + \pi \mu_0 t^2)) \exp(-j\pi k\mu_0 t^2) \exp(-j2\pi f t) dt. \quad (18)$$

考虑 $X_m^k(f)$ 的实部

$$\text{Re}[X_m^k(f)] = \sum_{k=1}^{\infty} \cos(2\pi f t - \phi(t)) dt, \quad (19)$$

其中 $\phi(t) = 2\pi m f_0 t + \pi(m - k)\mu_0 t^2$. (19) 式是一个 chirp 信号的积分, 在通常情况下无法得到闭式解, 但根据相位驻留原理可以得到近似^[19]. 应用相位驻留原理分析 (19) 式有: 对于任意的频率 f , 在相位 $2\pi f t - \phi(t)$ 变化较快的区间上, 其积分值由于余弦函数的正负振荡而相互抵消, 从而这些区间对积分的贡献可忽略不计; 而仅在相位慢变化的区域内 (称为相位驻留区域), 才使积分值显著不为零, 此时相位可近似为常数, 因此相位驻留点满足

$$\frac{d(2\pi f t - \phi(t))}{dt} = 0, \quad (20)$$

可得驻留点的时间函数 t_f 为

$$t_f = \frac{f - m f_0}{(m - k)\mu_0}. \quad (21)$$

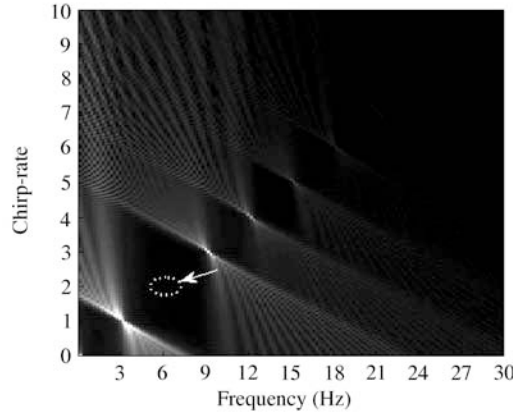


图 6 chirp 周期信号去除二次谐波后按调频率扫描的 SFRFT 谱平面图

Figure 6 The 2-D distribution of SFRFT magnitude of a chirp periodic signal without second harmonic in chirp rate-frequency plane

对于任意的频率 f , 仅在 $t_f \pm \Delta$ 区间内的积分使 $\text{Re}[X_m^k(f)]$ 显著不为零, 其中 Δ 是相位驻留区间, 是 f 的函数. 由于螺旋桨噪声信号的观测时间范围为 $0 - T_w$, 因此仅有当驻留时间点落在 $0 - T_w$ 范围内时 $\text{Re}[X_m^k(f)]$ 才显著不为零. 将 $t_f = 0 - T_w$ 带入 (21) 式, 可以得到 $\text{Re}[X_m^k(f)]$ 不显著为零的有效频谱范围是:

当 $m > k$ 时, 有 $mf_0 > kf_0$, 有效频谱范围: $mf_0 - \Delta_f \leq f \leq mf_0 + (m - k)\mu_0 T_w + \Delta_f$;

当 $m < k$ 时, 有 $mf_0 < kf_0$, 有效频谱范围: $mf_0 - (k - m)\mu_0 T_w - \Delta_f \leq f \leq mf_0 + \Delta_f$.

从上面的结论可以看出, 无论谐波次数 m 与 k 的大小关系如何, 有效频谱总是出现在频率 mf_0 附近且远离 kf_0 的一侧, 因而不会影响到 k 次谐波在 kf_0 处的谱值 $c_k T_w$. 图 6 是 chirp 周期信号去除其二次谐波后按调频率扫描的 SFRFT 谱平面图, 可以看到在 $(2f_0, 2\mu_0)$ 附近 (如箭头所指区域) 其他 chirp 谐波 SFRFT 谱总的影响几乎为 0.

得到此结论必须满足运用相位驻留原理的前提, 即观察时间内要有足够多的 chirp 周期:

$$N = \text{int}\left(f_0 T_w + \frac{1}{2}\mu_0 T_w^2\right) \gg 1. \quad (22)$$

此前提也可以理解为被动探测螺旋桨噪声时, 需要足够长的观测时间.

另外, 再将 $f = kf_0$ 带入 (21) 式可以得到驻留点时间函数

$$t_f = -\frac{f_0}{\mu_0} < 0. \quad (23)$$

此式表明若满足 $-f_0/\mu_0 + \Delta \leq 0$ 的条件, 即 f_0 不远小于 μ_0 时, $\text{Re}[X_m^k(f)]$ 的驻留区间不在观测范围内. 由于船舶螺旋桨的加速度 μ_0 往往不大, 且能产生空化噪声的起始轴频 f_0 应大于等于空化初生转速 f_I , 即 f_0 非极小值, 因此在被动探测螺旋桨噪声时, 均能满足此条件.

此外, 还需要考虑到 chirp 谐波系数的影响. 对于 chirp 谐波系数非常小的谐波分量 $c_h \exp(jh(2\pi f_0 t + \pi\mu_0 t^2))$, 其在 $(hf_0, h\mu_0)$ 点处的 SFRFT 谱值 $c_h T_w$ 仍为极小值, 此时其他谐波分量在该点的影响是不能忽略的, 其谱值被其他各次谐波的频谱淹没.

然而当观察时间足够长时, $|c_k|^2$ 表征了 chirp 谐波的功率, 因此谐波系数非常小的 chirp 谐波分量对于整个 chirp 周期信号能量的贡献是非常小的. 图 7 所示为 chirp 周期高斯脉冲串 $x_u(t)$ 前 K 次

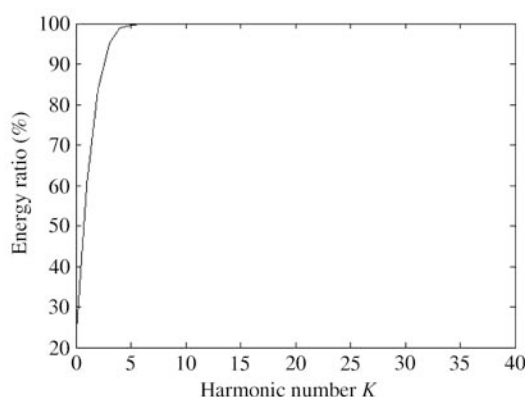


图 7 chirp 周期高斯脉冲串前 K 次谐波能量之和与整个信号能量的比例

Figure 7 The ratio of the energy summation of the former K -th harmonics to the energy of the whole signal

chirp 谐波的能量之和与整个信号能量的比值变化规律, 从图中可看到, 此仿真中高于 5 次的 chirp 谐波对能量的贡献几乎为零. 因此对于 chirp 周期信号而言, 当观察时间足够长, 且 $|c_h| < |c_{\max}|$ 时, 可忽略该次谐波的影响. 特别地, 由于高斯函数的频谱依然为高斯函数, 且高斯脉冲的能量集中在原点附近, 因此可将相对脉冲宽度较窄 (即 $\sigma = T/BC$ 较小) 的高斯脉冲串看作是高斯函数在时域的周期延拓, 从而可认为其 Fourier 系数呈现按高斯形递减趋势. 由于 chirp 谐波系数与 Fourier 系数的相等关系, 因此对于建模匀加速螺旋桨噪声调制包络的 chirp 周期高斯脉冲串 $x_u(t)$, 可认为当 $h \geq K$ 时, 有 $|c_h| < |c_{\max}|$. 并根据高斯脉冲的 Fourier 变换对^[20], 可得此时 K 满足 $\exp(-2\pi^2 K^2/B^2 C^2)$, 即有贡献的 chirp 谐波个数有限. 于是 $x_u(t)$ 及其谐波系数 c_k 间满足以下近似关系:

$$\begin{cases} x_u(t) = \sum_{k=-K}^K c_k \exp(jk(2\pi f_0 t + \pi \mu_0 t^2)), \\ c_k = \frac{1}{T_w} \int_{T_w} x_u(t) \exp(-jk(2\pi f_0 t + \pi \mu_0 t^2)) dt. \end{cases} \quad (24)$$

(24) 式给出了 chirp 周期信号及其 chirp 谐波系数在满足一定前提条件下的综合与分析关系, 能够为匀加速螺旋桨声信号的某些理论推导提供帮助. 如在推导匀加速螺旋桨的轴频变化率的最大似然估计器时, 可采用与文献 [12] 中相似的数学推导过程, 此时需要运用到 chirp 周期信号的综合与分析关系. 同时, (24) 式也表明加速螺旋桨噪声调制包络信号 SFRFT 按调频率扫描输出的峰值, 反映了各次 chirp 谐波的相对能量. 因此基于 1 型 SFRFT 适用于估计螺旋桨噪声调制包络各次谐波的起始频率和调频率.

5 仿真与试验数据对比分析

5.1 仿真分析

螺旋桨噪声的接收信号可表示为幅度调制的螺旋桨噪声与环境噪声的和^[14], 即

$$S(t) = E(t)n_a(t) + n(t). \quad (25)$$

式中 $E(t)$ 由 (16) 式确定, $n_a(t)$ 是高斯白的叶片空化噪声, $n(t)$ 是高斯白的环境噪声, 且 $n_a(t)$ 和 $n(t)$ 不相关. 取信噪比为 0 dB, 并根据下文中水洞试验的工况参数, 得到匀加速螺旋桨噪声的仿真数据. 根

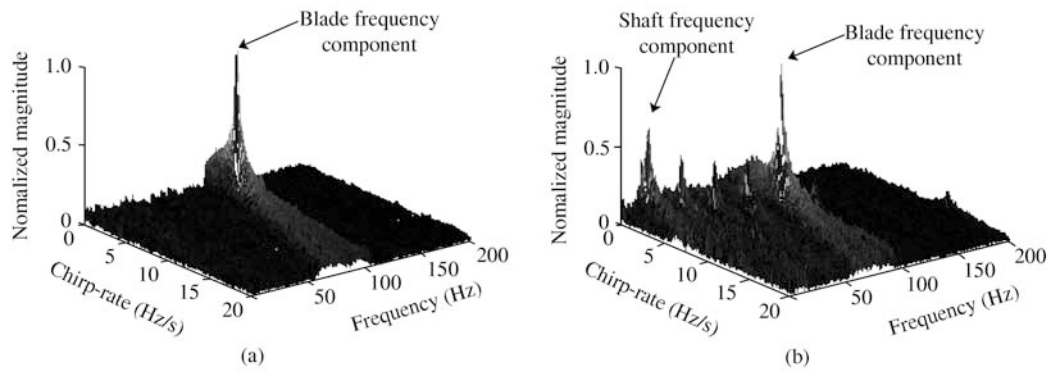


图 8 仿真数据解调输出随调频率变化的 SFRFT 幅度谱

Figure 8 The variations of SFRFT magnitude of demodulation output with the chirp rate

(a) Simulation data 1; (b) simulation data 2

据该信号模型及文献 [11,13] 中螺旋桨噪声的处理方法, 可按照如下步骤处理仿真数据: 1) 对匀加速螺旋桨噪声信号进行平方解调, 获得调制包络; 2) 采用简化分数阶 Fourier 变换对解调包络按调频率从小到大进行扫描, 以获取在调频率 - 频率平面上调制包络信号的幅度谱分布.

图 8 所示为仿真数据解调输出按调频率搜索的 SFRFT 幅度谱, 其中图 8(a) 取 $\bar{\xi}_1 = \bar{\xi}_2 = \bar{\xi}_3 = \bar{\xi}_4 = \bar{\xi}_5 = 0.5$, 是螺旋桨叶片间空化剧烈程度均匀时的仿真结果, 图 8(b) 取 $\bar{\xi}_1 = 1.2$, $\bar{\xi}_2 = 0.6$, $\bar{\xi}_3 = \bar{\xi}_4 = \bar{\xi}_5 = 0.5$ 是不均匀时的仿真结果.

从图 8(a) 中可以看到, 当空化程度较均匀时, 输出结果中仅叶频分量显著, 原因是: B 个叶片的噪声包络信号仅相位相差 $2\pi(i-1)/B$, 如 (9) 式所示, 所以当谐波次数非 B 的整数倍时, 各叶片噪声包络的同次 chirp 谐波会相互抵消. 而通常情况下, 螺旋桨的一个叶片要比其他叶片空化剧烈 [7,12], 因此除叶频分量外, 其他 chirp 谐波处也有谱峰出现, 如图 8(b) 所示, 且对应轴频和叶频处的谱峰相对显著.

5.2 试验数据分析

为了验证文中所述数学模型的合理性, 在中国船舶科学研究中心的大型循环水槽开展了加速螺旋桨噪声数据采集试验. 试验用目标螺旋桨是为某集装箱船设计的五叶缩比模型桨, 并通过整船模型形成周向非定常的尾流场. 试验时水流速度取 5 m/s, 压力 70 kPa, 观测时间 3 s, 采样频率 108.696 kHz. 为满足水洞试验相似准则的要求, 试验中螺旋桨转速变化范围约在 20-25rps.

以某次试验的数据为例, 图 9 分别显示了为 3 段 0.2 s 的包络解调输出信号. 从图中可以看到, 解调包络近似于多个连续的脉冲, 且脉冲幅度逐步增大并伴随起伏, 同时相等时间间隔内的脉冲个数增多. 这些特点与建模所用的幅度增大且起伏的 chirp 高斯脉冲串信号的时域波形相符合.

对两组水洞试验数据, 采用与仿真分析相同的方法处理, 可以得到如图 10 所示的解调输出按调频率搜索的 SFRFT 幅度谱. 螺旋桨处在不同的工作状态时, 叶片间表现出的空化程度有所不同. 试验数据 1 分析结果反映的是叶片间空化程度较均匀时的情况, 而试验数据 2 表现出的是叶片间空化程度不均匀的情况. 对比两组仿真数据与试验数据的分析结果, 图 8(a) 和图 10(a) 在叶频分量处出现明显的谱峰, 图 8(b) 和图 10(b) 在轴频分量和叶频分量处均出现明显的谱峰. 尽管受到试验条件影响, 如螺旋桨的转速不可能严格线性变化、系统噪声影响等, 试验分析结果与仿真分析结果有一定差异, 但

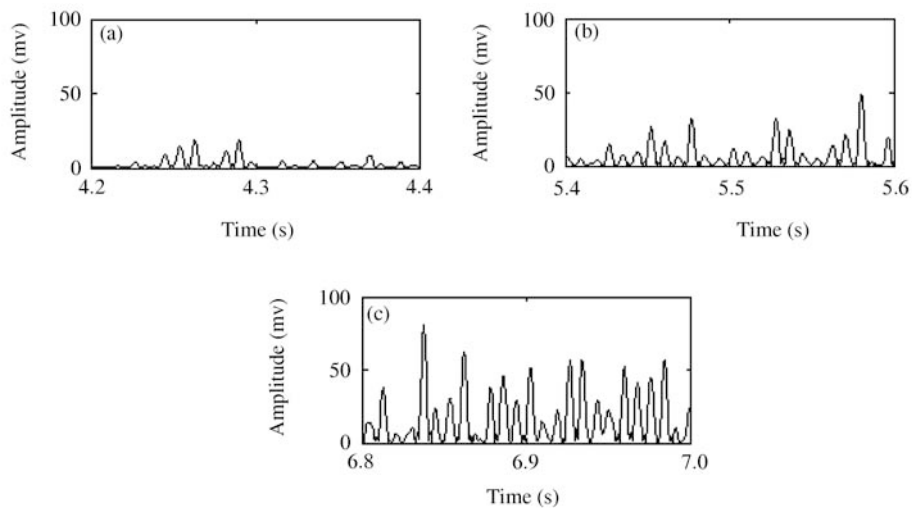


图 9 实验数据的包络解调输出信号

Figure 9 The demodulation output of the experimental data

(a) 4.2–4.4 s; (b) 5.4–5.6 s; (c) 6.8–7.0 s

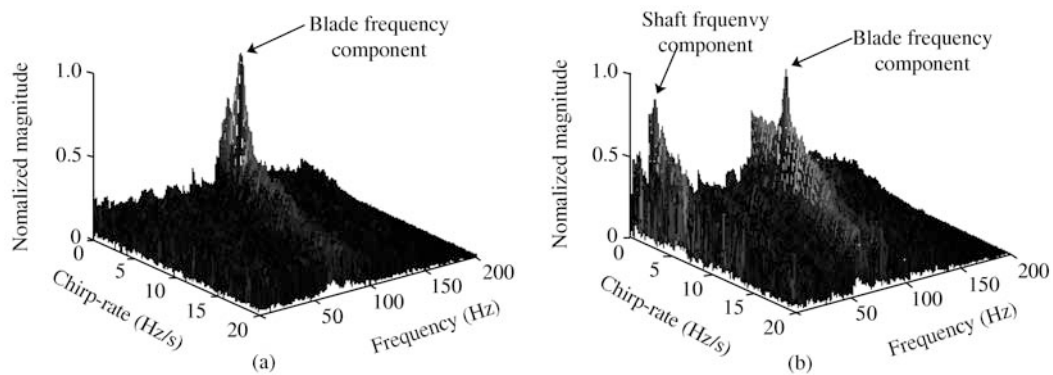


图 10 试验数据解调输出按调频率搜索的 SFRFT 幅度谱

Figure 10 The variations of SFRFT magnitude of demodulation output with the chirp rate

(a) Experimental result 1; (b) experimental result 2

由于在调频率 – 频率平面上 SFRFT 谱值分布的谱峰位置直接反映了螺旋桨噪声幅度调制的特点, 从而表明试验数据与仿真数据具有较好的一致性.

再取若干次试验数据进行分析, 并将 SFRFT 扫描输出的叶频分量峰值对应的初始频率和调频率值与螺旋桨转速随时间变化曲线最小二乘拟合的参考值对比列于表 1 中, 其中将叶频分量峰值对应的起始叶频及叶片变化率均除以叶片数以作比较. 从表中可以看到, 误差的值低于 2%, 说明试验数据处理结果比较好地反映了螺旋桨转速的变化情况.

试验数据解调包络输出及按调频率搜索的 SFRFT 幅度谱分布均与仿真分析具有较好的一致性, 表明本文提出的模型能较好地描述实际匀加速螺旋桨噪声信号, 因此建模方式是合理的.

表 1 转速估值与参考值比较

Table 1 A comparison of estimation results and nominal values

	Estimation results		Nominal values		Error	
	$f_0(\text{Hz})$	$\mu_0(\text{Hz/s})$	$f_0(\text{Hz})$	$\mu_0(\text{Hz/s})$	$f_0(\%)$	$\mu_0(\%)$
1	22.6424	0.7220	22.7367	0.7349	0.4186	1.7541
2	20	1.2540	20.1023	1.2557	0.5088	0.1330
3	21.9656	0.3380	22.0898	0.3340	0.5621	1.2051
4	22.1043	0.7597	22.0691	0.7640	0.1596	0.5635
5	20.4723	1.6929	20.4209	1.6840	0.2509	0.5274

6 结论

本文应用理论分析、建模仿真和试验验证相结合的研究方法, 对匀加速运动状态下螺旋桨噪声的信号特性进行了研究, 获得了以下结论:

(1) 螺旋桨匀加速时周向非均匀尾流速度变化具有 chirp 周期性, 桨叶相对来流速度及相对来流攻角也符合 chirp 周期变化规律.

(2) 提出以幅度起伏且增大的 chirp 周期高斯脉冲串信号建模匀加速螺旋桨噪声调制包络, 并推导得到了每个 chirp 周期起止时间的计算公式, 进而获得了匀加速螺旋桨噪声调制包络信号的时域表达式.

(3) 得到当观测时间足够长时, chirp 周期高斯脉冲串信号与其谐波系数间的综合与分析近似关系式. 该关系式也表明基于 SFRFT 的方法适用于提取螺旋桨噪声调制包络各个 chirp 分量的起始频率和调频率参数.

(4) 匀加速螺旋桨噪声的水洞试验数据分析结果与仿真分析结果具有较好的一致性, 说明了其调制包络仿真模型的合理性.

本文研究获得了匀加速螺旋桨噪声幅度调制包络的仿真模型及其特性, 为被动水声监测系统探测与分类离靠港运动目标的算法设计提供了理论依据. 在港口水域获取实船螺旋桨加速时的噪声数据, 并提出满足应用要求的探测分类算法是我们今后的研究目标.

参考文献

- 1 Smookler M S, Clark B G, Ostrander J M. Underwater detection and surveillance technology for commercial port and vessel security. In: Proceedings of MTS/IEEE OCEANS. Washington D C: IEEE, 2005. 935–940
- 2 Bick E T, Barock R T. CENTURION harbor surveillance test bed. In: Proceedings of MTS/IEEE OCEANS. Washington D C: IEEE, 2005. 1358–1363
- 3 James S, Warren D, Meggitt D. Naval maritime security test and evaluation site (NMSTES). In: Proceedings of MTS/IEEE OCEANS. Washington: IEEE, 2005. 1841–1843
- 4 Johnson E A. Unmanned undersea vehicles and guided missile submarines: technological and operational synergies. US Navy. Occasional Paper No. 27 for Air War College. 2002
- 5 Asada A, Kuramoto K, Tanaka T, et al. Development of underwater security sonar system. In: Proceedings MTS/IEEE OCEANS. Singapore: IEEE, 2007. 1–3, 16–19
- 6 Asada A, Maeda F, Kuramoto K, et al. Advanced surveillance technology for underwater security sonar systems. In: Proceedings of IEEE OCEANS'07. Aberdeen: IEEE, 2007. 1–5
- 7 Ross D. Mechanics of Underwater Noise. 3rd ed. Los Altos: Peninsula Publishing, 1983. 253–285

- 8 Tao D C. Spectrum of propeller cavitation noise (in Chinese). *Acta Acust*, 1982, 7: 344–351
- 9 Etter P C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. 3rd ed. New York: Spon Press, 2003. 225–229
- 10 Tao D C. A Study on ship-radiated noise rhythms (I) - mathematical model and power spectrum density. *Chinese J Acoust*, 1985, 4: 244–256
- 11 Kummert A. Fuzzy technology implemented in sonar system. *IEEE J Oceanic Eng*, 1993, 18: 483–490
- 12 Lourens J G, du Prcez J A. Passive sonar ML estimator for ship propeller speed. *IEEE J Ocean Eng*, 1998, 23: 448–453
- 13 Nielsen R O. *Sonar Signal Analysis*. Boston: Artech House, 1991. 95–140
- 14 Marián K, Luis W. Adaptive chirp-based time-frequency analysis of speech signals. *Speech Commun*, 2006, 48: 474–492
- 15 Luis W, Marián K. Self-organizing chirp-sensitive artificial auditory cortical model. In: *Proceedings of Interspeech*. Lisbon: ISCA, 2005. 705–708
- 16 Pei S C, Ding J J. Simplified fractional Fourier transforms. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17: 2355–2367
- 17 Qi L, Tao R, Zhou S Y, et al. Detection and parameter estimation of multicomponent LFM signal based on the fractional Fourier transform. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2004, 47: 184–198
- 18 Mann S, Haykin S. The chirplet transform: physical considerations. *IEEE Trans Signal Proces*, 1995, 43: 2745–2761
- 19 John C C, Robert N M. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: John Wiley, 1991. 142–147
- 20 Haykin S, Veen B. *Signals and Systems*. 2nd ed. New York: John Wiley, 2002. 775

Modeling and characteristic analysis of underwater acoustic signal of the accelerating propeller

FENG Yuan, TAO Ran* & WANG Yue

School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

*E-mail: rantao@bit.edu.cn

Abstract The signal feature of propeller cavitation noise during acceleration or deceleration procedure can be used to passively detect and classify moving vessels and underwater vehicles in the port regions. By analyzing the chirp periodicity of the variation of propeller wake velocity under acceleration situation, this paper presents the time domain expression of the modulation envelope signal of the accelerating propeller noise, treating the signal as a Gaussian-shaped chirp periodic pulse train with increasing trend and fluctuating pulse amplitude. The paper investigates the characteristics of simplified fractional Fourier transform (SFRFT) spectrum of the chirp periodic signal, and thus obtains the relation between the chirp periodic signal and its chirp harmonics under the conditions of underwater passive detection. Furthermore, the experimental data of the cavitation tunnel satisfy the results obtained by simulation, which verifies the correctness of the proposed signal model.

Keywords accelerating propeller, modeling of underwater acoustic signal, chirp periodic signal, simplified fractional Fourier transform