

基于谐波簇自适应线谱增强器的舰船轴频电场检测

刘彦琼, 岳瑞永, 田作喜, 韩晶

(中国船舶重工集团公司第七六〇研究所, 辽宁 大连 116013)

摘要: 针对舰船轴频电场存在于1~7 Hz的频率范围且存在明显谐波成分的特点, 将谐波簇自适应线谱增强技术运用到舰船轴频电场信号处理中。通过仿真研究确定了相关参数, 对测试信号处理后, 其线谱功率谱强度较附近连续谱增强了0.056 $\mu\text{V}/\text{m}$, 可见将该方法运用于电场轴频信号处理可以有效地抑制背景噪声。

关键词: 轴频电场; 谐波簇; 自适应线谱增强

中图分类号: U664.33 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)02-0029-04

Ship Shaft-frequency Electric Field Testing Based on Harmonic Waves Adaptive Line Enhancer

LIU Yan-qiong, YUE Rui-yong, TIAN Zuo-xi, HAN Jing

(No. 760 Research Institute of CSIC, Dalian 116013, China)

Abstract: Shaft-frequency electric field of ship exists in 1~7 Hz and it has obvious harmonic waves. For these characteristics, harmonic waves adaptive line enhancer technology was applied to signal processing of the shaft-frequency electric field of a ship. Correlative parameters were determined through simulation. This method was used in measurement signal. The power spectrum intensity of line spectrum increased by 0.056 $\mu\text{V}/\text{m}$ higher than continuous spectrum. It was proved that background noise can be restrained effectively in shaft-frequency electric field signal with this method.

Key words: Shaft-frequency electric field; harmonic waves; adaptive line enhancer

舰船水下电场通常分为准静态电场和交变电场, 它们之间的划分以大于或小于0.1 Hz为准。舰船电场各频段的信号都有足够的强度使其能通过一般测试技术被检测到^[1]。舰船的轴频信号产生了数

赫兹的低频信号, 由于舰船正常航行时其螺旋桨的转速是恒定的, 故有明显的线谱特征, 基频为螺旋桨的转动速率, 大约在1~7 Hz且具有明显的谐波成分^[2]。由于舰船轴频在浅海环境下传播距离较远, 因此成

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 水下测控技术国防科技重点实验室项目(9140C260304080C26)

作者简介: 刘彦琼(1979—), 女, 云南人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事信号处理研究工作。

为舰船探测的特征信号源之一。舰船在海水中产生的极低频电场随着传播距离的增大衰减较快,因此很容易被环境噪声所掩盖,给远程探测带来困难。海军工程大学对于电场轴频信号的特征提取方法开展了详细而深入的研究^[1]。李松、卢新城等人利用11/2维谱加强成整数倍谐波信号的基频分量,从而抑制高斯有色噪声及对称分布的噪声^[2]。毛伟、林春生等人提出了基于高阶FS谱对角切片的舰船轴频电场微弱信号检测方法^[4]。包中华等人提出了基于自适应累量算法的舰船轴频电场信号检测方法,该方法利用高阶累量对高斯噪声进行抑制^[5]。马育锋、王向军分别提出了基于小波变换的目标信号检测方法和基于小波分析的自适应线谱增强信号提取^[6]。文中将谐波簇自适应线谱增强器的方法引入到电场轴频信号处理中,取得了很好的效果。

1 舰船电场信号特征

笔者采用的水下电场测量系统拥有0.01~1 Hz和1~1 000 Hz 2个数据采集通道,可以获得0.1 Hz~1 kHz的舰船电场数据。由于轴频电场基频信号大约分布在1~7 Hz,且具有明显的谐波成分,所以文中的信号分析主要是针对100 Hz频率范围以内的信号。

图1给出了某艇轴频电场时域信号,可知:电场x,y和z分量出现的峰值数分别为1个、2个和2个。3个分量的极值时刻一致,x分量最大,y分量和z分量较小。x,y和z分量的量值受到正横距的影响,因而存在幅值上的差异。另外,由于高阻性质的海床会使电流流向发生改变,电流大部分会被排斥到海水中,只有一小部分能穿透海水-海床界面进入海底,这就导致了海床表面电场垂直分量幅度要小于水平分量。

由于电场信号为随机过程,其信号功率谱 $X(f)$ 可用下式计算:

$$X(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|X_{k,T}(f)|^2] \tag{1}$$

式中: T 为傅里叶变换时截取的每段信号长度; E 为集合平均值; k 为信号段的编号。式(1)是噪声谱在上述数学模型下的严格定义,要获取无穷多个信号段,每个信号段的时间长度都要趋于无穷。由于在实际中只能做有限长和有限数的集合平均,因此其单边功率谱 $\hat{G}(f)$ 估计为:

$$\hat{G}(f) = \frac{2}{nT} \sum_{k=1}^n |X_{k,T}(f)|^2 \tag{2}$$

实际的谱分析要考虑式(2)中信号段长度和理想模型下平均次数 n 的选取。

根据对典型数据的分析可以确定对舰船轴系极低频电场信号的功率谱分析参数选为: $n=55, T=26.2144\text{ s}$ 。

对多组实测舰船的功率谱密度曲线的分析结果总结出舰船轴系电场信号具有如下的频域特征:1)舰船的轴频存在于1~7 Hz范围,并有5~14阶的谐波;2)线谱强度可高于附近连续谱可达100~300 $\mu\text{V/m}$;3) x, y, z 分量上均有轴频及其谐波成分,如图2所示;4)舰船电场的轴频及其谐波分量分布在30 Hz的频率内;5)在低频范围内存在较强的干扰。

2 谐波簇自适应线谱增强器

假设舰船轴频电场信号是具有轴频为 f_0 的谐波簇线谱,调制线谱簇为^[7-8]:

$$p(t) = \sum_{n=1}^N \cos(2\pi n f_0 t) + n(t) \tag{3}$$

式中: f_0 为轴频,有 N 个谐波分量; n 取1~ N 之间

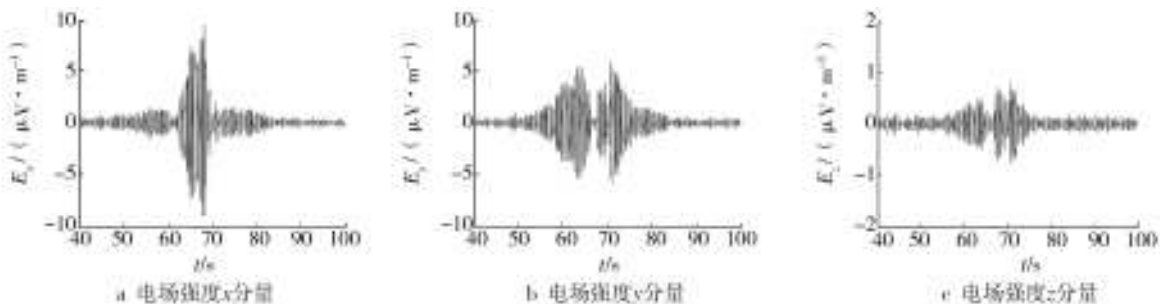


图1 某艇轴频电场时域信号

Fig. 1 Time-domain signal of a boat shaft-frequency electric field

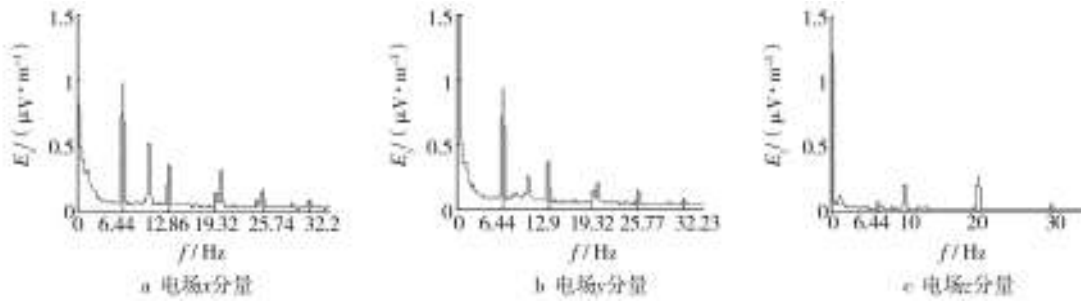


图2 某艇轴频电场频域信号

Fig. 2 Frequency-domain signal of a boat shaft-frequency electric field

的自然数; t 为时间; $n(t)$ 为背景噪声信号。

图3给出了谐波簇自适应线谱增强器的原理结构。通过频率扫描,当输入信号 $p(t)$ 中的谐波分量与谐波簇参考输入信号的频率对应时,输入信号的谐波分量即可被增强。输入信号是 $p(t)$,参考信号的轴频为 f_i ,扫描步距为 Δf ,从低频开始扫描。每次扫描的谐波簇有 L 组参考输入信号,每组输入的2个参考信号 $r_s(t), r_c(t)$ 是相互正交的,分别为:

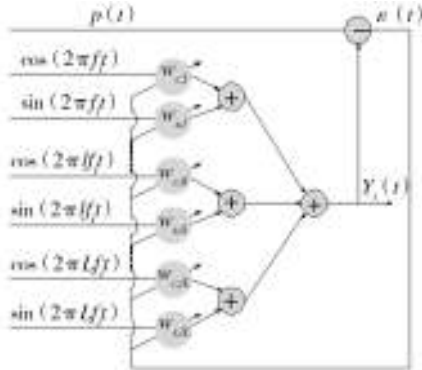


图3 谐波簇自适应线谱增强器原理

Fig. 3 Schematic of harmonic waves adaptive line enhancer

$$\begin{cases} r_s = \cos(2\pi l f_i t) \\ r_c = \sin(2\pi l f_i t) \end{cases} \quad (4)$$

各组参考信号的中心频率成谐波关系。 l 取 $1 \sim L$ 之间的自然数。调整谐波簇基频 f_i, f_i 变化范围即轴频取值范围。每扫描一个基频 f_i ,就要经过一次谐波簇累加,权向量迭代的公式如下:

$$Y_i(k) = \sum_{l=1}^L w_{c,il} \cdot \cos(2\pi l f_i k / f_s) + \sum_{l=1}^L w_{s,il} \cdot \sin(2\pi l f_i k / f_s) \quad (5)$$

$$\varepsilon_i(k) = p(k) - Y_i(k) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{W}_c(k+1) = \mathbf{W}_c(k) + \mu \varepsilon_i(k) r_c(k) \\ \mathbf{W}_s(k+1) = \mathbf{W}_s(k) + \mu \varepsilon_i(k) r_s(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Y_i 即为谐波簇在基频 f_i 时的谐波簇ALE输出; $\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s$ 为 $L \times 1$ 阶权向量,初始值均为0; $r_c = \{r_{c_i}(k)\}, r_s = \{r_{s_i}(k)\}, i=1, 2, \dots, L$ 。

当谐波簇的基频 f_i 或其倍频没有与线谱重合时,不会增强 f_i 或其倍频对应的频谱,也不会增强噪声。

经过全频段扫频处理之后,当 $f_i=f_0$ 时系统输出线谱能量最大,即可通过谱级信噪比最大为准则,选择谐波簇自适应线谱增强器最佳输出。此时参考基频 f_i 即为目标轴频。

3 仿真研究及参数讨论

仿真条件:工作频率范围为 $1 \sim 100$ Hz,干扰背景为高斯带限白噪声,轴频为7 Hz,共有5个谐波分量,采样频率 $f_s=1000$ Hz,信号长度为4 s,令输入信噪比为6 dB,自适应步长 $\mu=0.001$,自适应权个数 $N=8$ 。仿真结果如图4所示。

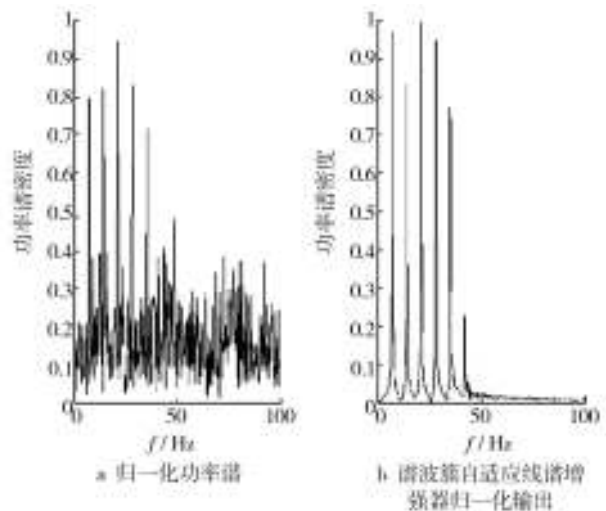


图4 谐波簇自适应线谱增强器仿真归一化结果

Fig. 4 Normalized result of harmonic waves ALE simulation

f 取值范围为1~20 Hz,步长 $\Delta f=1$ Hz。信号中含有5个谐波线谱分量,轴频 $f_0=7$ Hz,分别取参数 $\mu=0.001, N=8$; $\mu=0.0001, N=8$; $\mu=0.001, N=16$; $\mu=0.0001, N=16$ 。计算各个频率点的谐波簇自适应线谱增强器输出的能量,计算结果如图5所示:在频率 $f_0=7$ Hz处能量最强; $f_0=14$ Hz处能量次之;从能量最强处可确定轴频为7 Hz。根据计算结果确定参数 $\mu=0.001, N=8$ 。

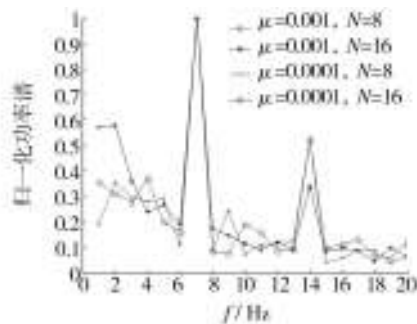


图5 不同频率点谐波簇自适应线谱增强器输出的归一化功率谱
Fig. 5 Normalized energy of different frequencies waves ALE output

4 对实测信号进行线谱增强处理

对实测数据运用谐波簇自适应线谱增强,得到其功率谱如下。

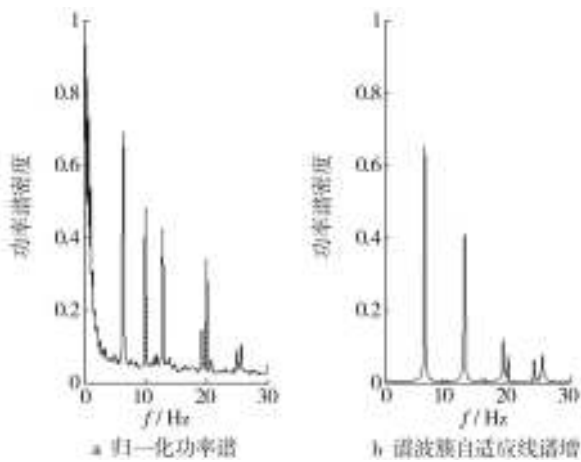


图6 某船电场y分量谐波簇自适应线谱增强处理归一化结果
Fig. 6 Normalized processing results of harmonic waves ALE in y component of a boat electric field

从图6中可以看出,在功率谱可以检测出线谱信号的情况下,运用谐波簇自适应线谱增强技术可以降低噪声背景,并且抑制非轴频及其谐波的频率

成分,从而达到线谱增强的效果。对于信号较微弱的情形,该方法能够得到更好的处理效果,见表1。

表1 某船电场y分量谐波簇自适应线谱增强前后强度比对
Table 1 Comparison of intensity between initial signal and processing results of harmonic waves ALE in y component of electric field

| 项目 | $\Delta E/(\mu V \cdot m^{-1})$ | | | |
|-----|---------------------------------|---------|---------|---------|
| | 6.4 Hz | 12.8 Hz | 19.2 Hz | 25.6 Hz |
| 处理前 | 0.591 8 | 0.359 8 | 0.106 4 | 0.065 7 |
| 处理后 | 0.648 0 | 0.402 3 | 0.107 5 | 0.064 3 |

注: ΔE 为线谱强度高于附近连续谱的强度。

5 结论

针对舰船轴频电场存在于1~7 Hz之间,且存在明显谐波成分的特点,将谐波簇自适应线谱增强技术运用到舰船轴频电场信号处理中。从实测舰船电场信号的处理结果来看,经过谐波簇自适应线谱增强处理后电场轴频信号与处理前相比,线谱强度高于附近连续谱的强度,增加了 $0.056 \mu V/m$,由此可见将谐波簇自适应信号处理方法应用于电场轴频信号处理可以达到抑制背景噪声的目的。

参考文献:

- [1] 龚沈光,卢新城. 舰船电场特性初步分析[J]. 海军工程大学学报,2008,20(2):1—4.
- [2] 卢新城,龚沈光,林春生. 自适应增强在舰船轴频电场信号检测中的应用[J]. 数据采集与处理,2004,19(4):438—440.
- [3] 李松,卢新城,李俊,等. 基于11/2维谱的舰船轴频电场线谱提取[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(5):892—894.
- [4] 毛伟,林春生,周萌. 基于高阶FS谱对角切片的舰船轴频电场微弱信号检测方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2009,33(2):325—328.
- [5] 包中华,龚沈光,李松. 基于自适应累量算法的舰船轴频电场信号检测方法[J]. 海军工程大学学报,2009,21(4):13—16.
- [6] 马育峰,龚沈光,姜润翔,等. 基于小波变换的目标信号检测方法[J]. 数据采集与处理,2009,15(3):21—25.
- [7] 殷敬伟,匡锐,王逸林. 谐波簇自适应线谱增强器在DEMON分析中的应用[J]. 声学及电子工程,2008(增刊):1—3.
- [8] 江峰,惠俊英,蔡平. 谐波簇干扰自适应抵消器[J]. 声学学报,2000,25(1):21—25.