

相干累加与AR滤波相结合的舰船轴频电场信号处理方法

程锦房¹, 谢昌奇², 张伽伟^{1*}, 喻鹏³

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北武汉 430033; 2. 中国人民解放军92214部队, 浙江宁波 315000;

3. 海军士官学校兵器系, 安徽蚌埠 233000)

摘要:针对采用电场传感器阵列测量舰船电场的应用场景,为提升目标轴频电场的信噪比,提出一种相干累加结合自回归(autoregressive, AR)模型滤波的方法对阵列电场信号进行处理。对测量得到的阵列电场信号进行时延补偿后累加,同时对环境电场信号进行AR建模,并利用AR模型参数构造滤波器,以对累加后的信号实施滤波处理。为验证所提方法在低信噪比条件下的有效性,对实测阵列式电场信号进行处理,结果表明,所提方法能够在信噪比为 -25.39 dB的条件下有效压制噪声频谱,保留轴频线谱,处理后信噪比提高约 21.92 dB。

关键词:轴频电场;阵列信号处理;相干累加;AR模型滤波

中图分类号:TN911 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)03-229-08

Delayed accumulation combined with AR filtering for naval axial frequency electric field signal processing

CHENG Jinfang¹, XIE Changqi², ZHANG Jiawei^{1*}, YU Peng³

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. The PLA Unit 92214, Ningbo 315000, China; 3. Weapons Department, Naval Cadet School, Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to improve the signal-to-noise ratio of the target axial frequency electric field, a coherent accumulation method combined with AR(autoregressive) model filtering was proposed to process the array electric field signal for the application scenario of using an array of electric field sensors to measure the electric field of a ship. The measured array electric field signal with time delay compensation was accumulated. The ambient electric field signal was AR modeled. By using the parameters of AR model, a filter was constructed to filter the accumulated signal. To verify the effectiveness of the proposed method under low signal-to-noise ratio conditions, the measured array electric field signals were processed. Results show that the proposed method can effectively suppress the noise spectrum and retain the axis frequency line spectrum under the condition of a signal-to-noise ratio of -25.39 dB. After keep the axial frequency line spectrum, the signal-to-noise ratio increased by about 21.92 dB.

Keywords: shaft-rate electric field; array signal processing; delayed accumulation; autoregressive model filtering

舰船在海水中航行时,腐蚀电流和防腐电流在主轴和螺旋桨的调制作用下会在其周围生成轴频电场信号^[1-2]。时域上,轴频电场信号幅值通常可达 $\mu\text{V}/\text{m}$ 量级,能够被电场传感器测量出来;频域上,轴频电场信号能量主要集中在 $0.5 \sim 30$ Hz,能够传播较远的距离,而且具有明显的线谱特征,基频与螺旋桨转动频率一致。正是由于舰船轴频电场信号具有传播距离远以及线谱特征明显等特点,可将其用于水中目标的探测、识别以及跟踪。当舰船距离比较远时,舰船电场信号比较微弱,加上舰船电场隐身技术的不断发展,且环境中存在大量的干扰信号,导致所

测量得到的信号信噪比较低,特别是在高海况下,将有用的电场信号从噪声中提取出来变得更加困难。对舰船电场信号进行测量以及降噪并提取其有效特征一直是学者们研究的重点和难点。

文献[3-4]提出利用自适应线谱增强的方法来将轴频线谱从背景噪声谱中提取出来,该方法无须参考噪声就能实现在低信噪比条件下线谱增强。文献[5]通过计算电场信号的 $11/2$ 维谱来代替经典功率谱,实现微弱的电场信号从背景噪声中的提取。文献[6]使用小波包对电场信号进行降噪,并验证该方法能够在低信

噪比下实现对舰船电场的检测,但是存在计算量大的问题。文献[7]利用海洋环境噪声建立自回归(autoregressive, AR)模型,并以该模型对电场信号进行前向预测,通过比较预测误差来实现对舰船电场信号的检测。文献[8]以电场信号的 AR 模型参数作为检测特征来检测舰船电场信号。文献[9]提出的基于 Rao 检测器的滑动门限检测方法可以在非高斯噪声环境下有效对轴频电场进行检测。

以上研究使用的舰船电场数据都是基于单节点沉底式平台的测量系统来测量得到的。为了进一步提高舰船电场的探测能力,本文应用一种线性阵列电场测量系统来进行海上舰船电场测量试验,并提出用相干累加结合 AR 滤波的方法对实验得到的各路信号进行处理。

1 舰船轴频电场及环境电场特性分析

为了开展阵列式电场探测,2020 年开展了阵列探测实验,其探测系统示意如图 1 所示,主要由电场传感器、电场传感器阵列电缆、多通道信号采集处理模块和电池模块组成,电场传感器由 7 个 Ag/AgCl 电场传感器组成,沿直线均匀分布在海底,每两个传感器之间的间距为 20 m。



图 1 阵列式电场探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of array type electric field detection system

为了检验该探测系统的噪声等性能是否满足舰船电场的测量条件,在实验室水池进行系统噪声测试,得到系统自噪声功率谱如图 2 所示,从图

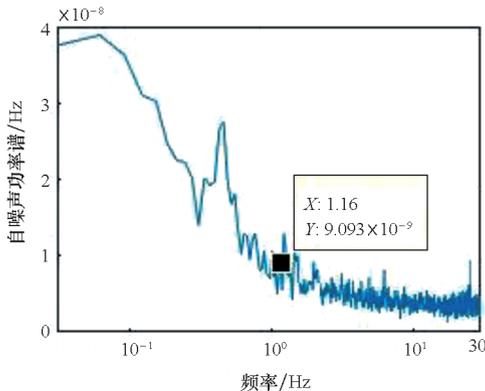


图 2 系统自噪声功率谱

Fig. 2 System self noise power spectrum

中可以发现,系统噪声在 0.5 ~ 30 Hz 频段内小于 10 nV/√Hz,而舰船电场的量级可达到 mV,因此该系统满足测量要求。

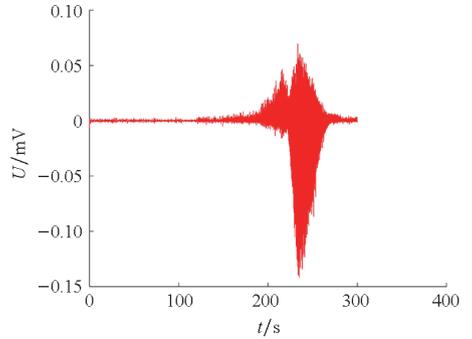
测量时以第一个电场传感器为参考电极,分别测其他传感器与它的电压差,分别为 $U_{12}, U_{13}, U_{14}, \dots, U_{1i}$,测得的每路信号表达式可表示为:

$$U_{1i}(t) = s_{1i}(t) + n_{1i}(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

其中, $s_{1i}(t)$ 为各个电场传感器接收的目标电场信号, $n_{1i}(t)$ 为噪声信号, N 为电场传感器个数。

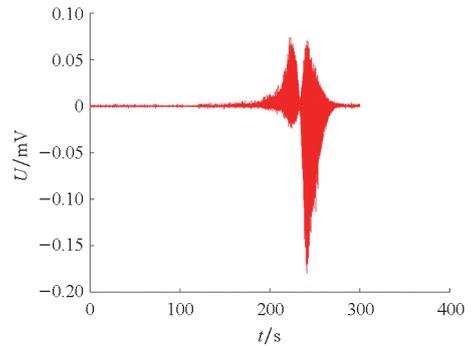
实测得到船舶在一个航次的六路电场信号时域图如图 3 所示。

截取图 3 中第一路信号中第 200 ~ 250 s 的一段进行功率谱分析,得到其归一化功率谱密度如图 4 所示,可以看出,舰船轴频电场在频域上线谱



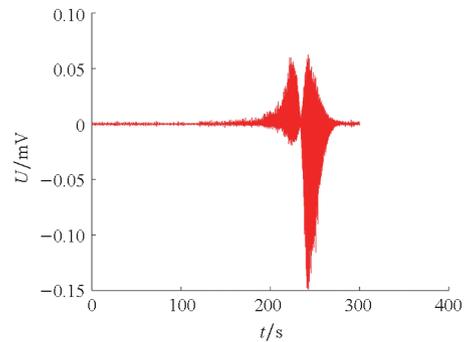
(a) 第一路电场信号

(a) The first electric field signal



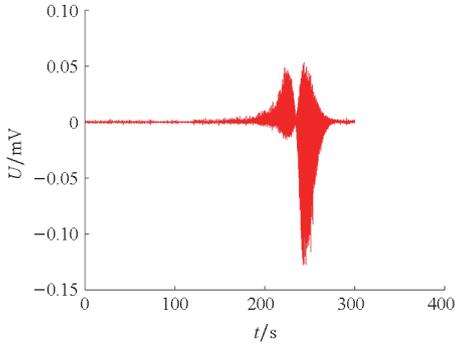
(b) 第二路电场信号

(b) The second electric field signal



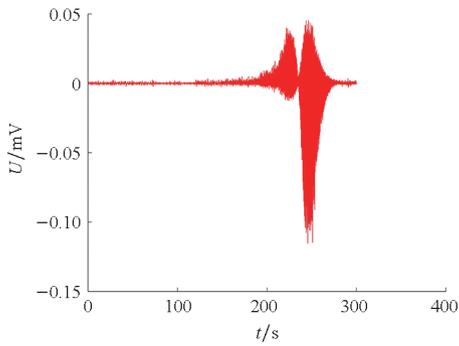
(c) 第三路电场信号

(c) The third electric field signal



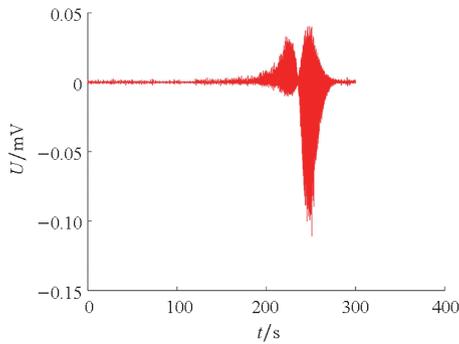
(d) 第四路电场信号

(d) The fourth electric field signal



(e) 第五路电场信号

(e) The fifth electric field signal



(f) 第六路电场信号

(f) The sixth electric field signal

图3 海上实测舰船电场阵列信号

Fig.3 Array signal of the electric field of the ship measured at sea

特征明显,并存在许多倍频信号。因此,可以通过检测电场信号频谱中是否存在线谱来判断是否存在舰船。

实测某时段的海洋环境电场信号时域及频域特征如图5所示。由图可知,环境电场干扰峰峰值在20 μV/m量级左右,在频域上看,能量集中在1 Hz以下。

为了对阵列探测中背景噪声的抑制方法进行研究,需进一步对环境噪声的高斯性进行检验。主要采用的方法是每次检验在测得的信号中截取四段样本,样本的起点随机选取且相同,长度分别

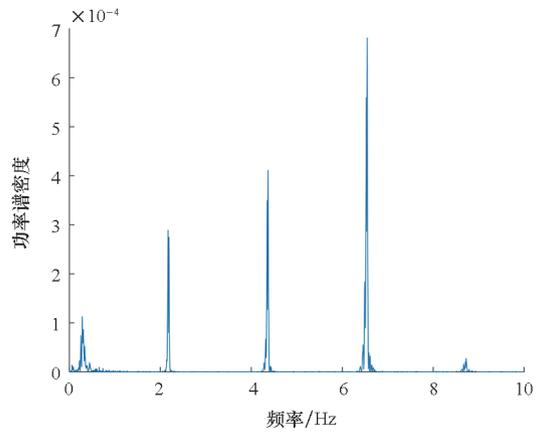
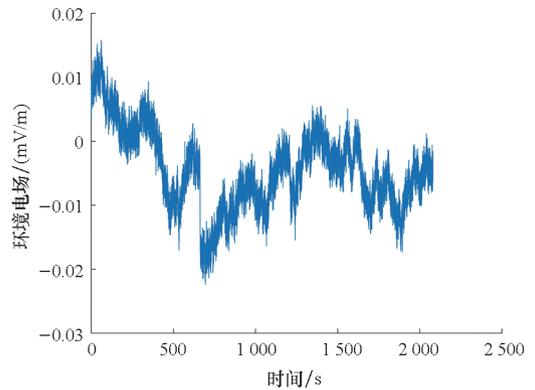


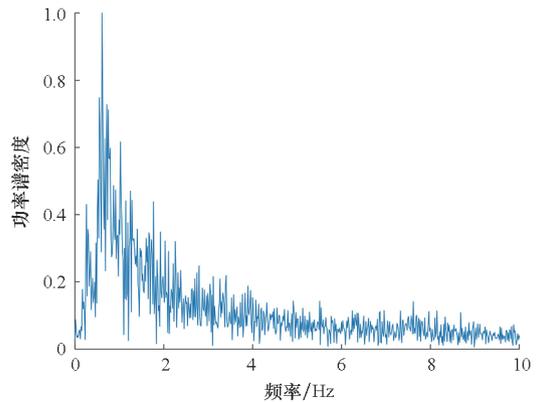
图4 实测舰船轴频电场功率谱密度

Fig.4 Measured ship axial frequency electric field power spectrum density map



(a) 时域特性

(a) Time domain characteristics



(b) 频域特性

(b) Frequency domain characteristics

图5 海洋环境电场信号

Fig.5 Electric field signal of marine environment

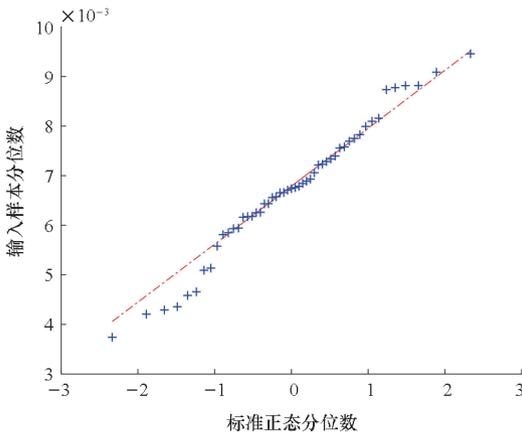
为2 s、4 s、8 s、16 s,画出这四段样本的QQ图^[10](quantile quantile plot),通过观察图形是否近似为一条直线来初步判断样本数据是否具有高斯性。再利用 Epps-Pulley 方法^[11]来进一步检验。该方法检验统计量如式(2)所示。

$$T_{EP} = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} \exp\left\{-\frac{(x_j - x_k)^2}{2m_2}\right\} - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp\left\{-\frac{(x_j - \bar{x})^2}{4m_2}\right\} \quad (2)$$

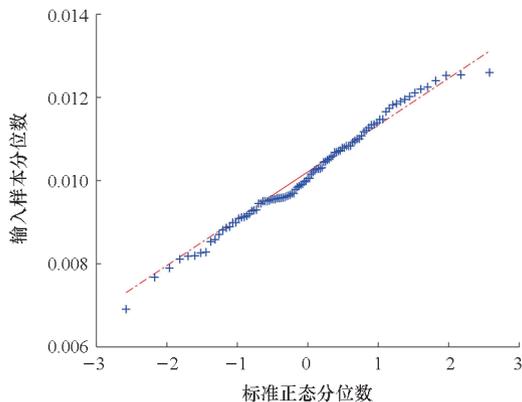
式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$, $m_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$ 。观测值的次序是随意的,但应注意的是,在整个计算中选定的次序必须保持不变。如果计算出的检验统计量 T 的值小于给定显著性水平 α 和样本量 n 确定的分位数 p ,则接受零假设,样本服从高斯分布。

得到海洋环境电场信号的 QQ 图如图 6 所示,从图中可以看出,四段噪声数据的 QQ 图都近似呈一条直线,且与红色虚线拟合较好,可以初步判定海洋环境电场噪声具有高斯性。

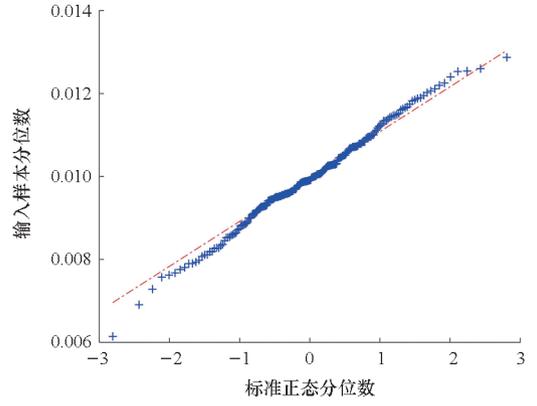
利用 Epps-Pulley 方法来进一步检验,并统计在不同显著性水平 α 下检验结果符合高斯分布的概率,统计结果如表 1 所示。从表中结果可以看到,显著性水平 α 越小,噪声呈高斯分布的概率越大;随着截取的时间段变长,噪声的高斯性越强,在使用 AR 滤波对信号进行处理时,为保证信号处理的实时性,一般只需选取 10 s 左右的环境电场数据进行 AR 建模即可,因此可以得出结论,



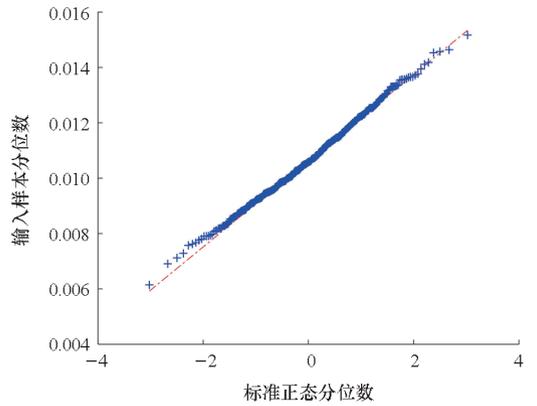
(a) $t = 2$ s



(b) $t = 4$ s



(c) $t = 8$ s



(d) $t = 16$ s

图 6 海洋环境电场信号 QQ 图

Fig. 6 QQ diagram of the electric field signal of the marine environment

即用来对电场信号进行处理的环境噪声信号具有很好的高斯性。

表 1 Epps-Pulley 检验的统计结果

Tab. 1 Statistical results of Epps-Pulley test

| 噪声长度/s | α | | | |
|--------|----------|-------|-------|-------|
| | 0.010 | 0.025 | 0.050 | 0.100 |
| 2 | 80.0 | 77.5 | 75.0 | 72.5 |
| 4 | 95.0 | 92.5 | 90.0 | 82.5 |
| 8 | 99.0 | 95.0 | 92.5 | 87.5 |
| 16 | 99.2 | 97.1 | 95.6 | 94.0 |

2 相干累加基本原理

电场传感器阵列对舰船电场信号的测量与单对电极测量相比,能够获得多路电场信号,由前节分析可知,环境电场具有高斯性,而舰船轴频电场具有明显线谱特征且各路信号具有较强的相关性,因此可以采用多路信号相干累加的方法提高

信噪比,即累加过程中由于干扰的高斯性,干扰不会累加,而有用信号会累加以提高信噪比^[12]。

由于各个传感器到电场场源距离不一样,即信号调理电路的差异,所测得的信号有一定时间延迟,累加之前将各路信号之间的时间延迟 τ_i 求出,并进行时延补偿,使各个传感器接收到的目标电场信号对齐,经过时延补偿后的信号可以表示为:

$$U_{i_i}(t) = s_{i_i}(t - \tau_i) + n_{i_i}(t) \quad (3)$$

最后将对齐的电场信号进行累加,由于目标电场信号相关,噪声不相关,因此累加后能够去除部分噪声。图7所示为相干累加的原理框图。

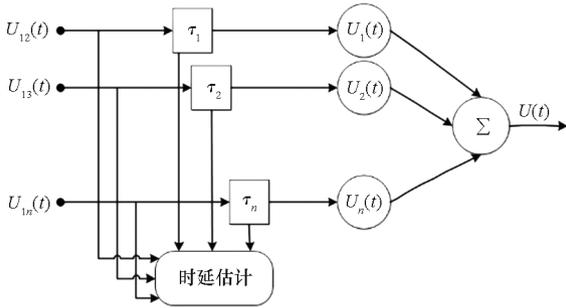


图7 相干累加原理框图

Fig. 7 Block diagram of the delayed accumulation principle

可通过广义互相关法^[13]来得到时延,首先假设两路电场信号分别为:

$$U_1(t) = s_1(t - \tau_1) + n_1(t) \quad (4)$$

$$U_2(t) = s_2(t - \tau_2) + n_2(t) \quad (5)$$

$U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 的互相关函数可以表示为:

$$R_{12}(\tau) = E[s_1(t - \tau_1)s_2(t - \tau_2 - \tau)] + R_{n_1n_2}(\tau) \quad (6)$$

为了简化计算,一般可以认为噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 是互不相关的,所以 $R_{n_1n_2}(\tau)$ 即互相关函数可以简化为:

$$R_{12} = E[s_1(t - \tau_1)s_2(t - \tau_2 - \tau)] \quad (7)$$

当 $\tau = \tau_1 - \tau_2$ 时,取最大值,因此可以根据互相关函数的最大值来得到信号的时延。

假设有 M 个电场传感器,一共可以得到 $M - 1$ 路信号,经过时延累加后的表达式为:

$$U(t) = \sum_{i=2}^M U_{i_i}(t) = \sum_{i=2}^M s_{i_i}(t - \tau_i) + \sum_{i=2}^M n_{i_i}(t) \quad (8)$$

3 基于AR模型的白化滤波器基本原理

大多数的平稳随机过程都是可以等价于通过用白噪声来激励一个线性时不变系统的响应,可

以用AR模型对该线性时不变系统进行描述,该模型^[14]的表达式为:

$$x(n) = \sum_{i=1}^p a_i x(n - i) + e(n) \quad (9)$$

式中: $e(n)$ 为白噪声序列;方差为 σ^2 ;系数 $a_i (i = 1, \dots, p)$ 为AR参数; p 为AR阶次,即 p 阶自回归AR模型,简记为 $AR(p)$ 。

如果利用该AR模型的逆过程,输入序列 $x(n)$,就可以得到一个白噪声序列 $e(n)$,从而实现噪声的白化,该过程也被称为AR模型的白化滤波^[15-17],该滤波器的传递函数为:

$$H(z) = 1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i} \quad (10)$$

式中, a_i 为AR模型系数。

由前面假设可知,电场传感器接收的电场信号为:

$$U(t) = s(t) + n(t) \quad (11)$$

式中, $s(t)$ 为舰船电场信号, $n(t)$ 为海洋环境电场噪声。

前面已经证明了海洋环境电场噪声具有良好的高斯性,可以看作平稳随机过程,如果在没有舰船电场信号时测得一段海洋环境电场数据,再用建立AR模型来对其进行拟合,求出模型参数并构造白化滤波器,将电场传感器接收的电场信号通入该滤波器中,输出为:

$$\begin{aligned} w(n) &= U(t) * h(n) = s(t) * h(n) + n(t) * h(n) \\ &= s(t) * h(n) + e(n) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $h(n)$ 为 $H(z)$ 的单位抽样响应,原理框图如图8所示。

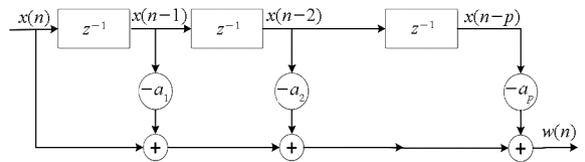


图8 AR滤波原理图

Fig. 8 Block diagram of the AR filtering principle

由式(12)可以看出,海洋环境噪声经过滤波器输出后变成了白噪声,从而达到了抑制环境噪声的目的。

4 实测数据验证

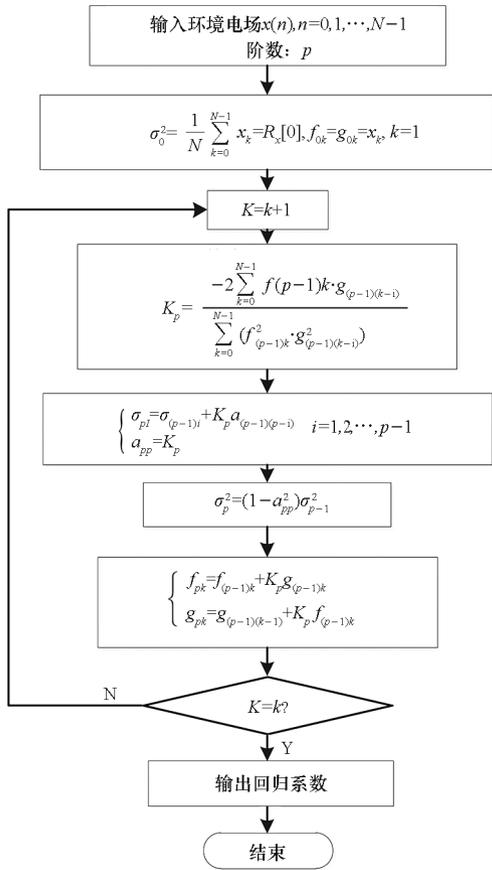
相干累加与AR滤波结合的信号处理方法原理框图如图9所示,具体流程为:

- 1) 使用广义互相关法计算各路信号之间的时延 τ_i ;
- 2) 对各路信号进行时延补偿后累加得到 $U(t)$;

3) 对海洋环境电场信号进行 AR 建模, 计算出 AR 模型参数, 求解步骤如图 9(a) 所示;

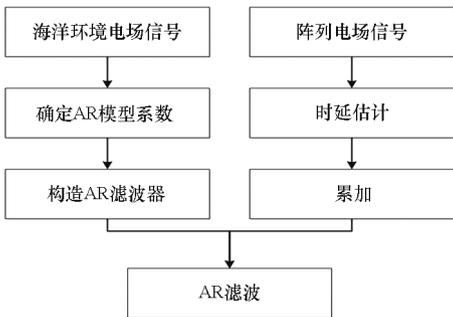
4) 利用计算出的 AR 模型参数构造滤波器对 $U(t)$ 进行滤波后得到的信号就是处理后的信号。

文方法的有效性, 使用自适应线谱增强的方法对该段信号进行处理, 并对处理前后的信噪比进行计算, 单独使用相干累加和 AR 滤波信噪比分别能够提高 5.85 dB 和 7.92 dB, 而经过相干累加与 AR 滤波相结合处理后信噪比提高了 21.92 dB。处理前后的归一化功率谱如图 10 所示。通过对比可以发现, 原信号功率谱中, 轴频线谱已经淹没在了噪声中, 分辨不出舰船的线谱特



(a) AR 参数求解流程

(a) Flow chart of AR parameter solving



(b) 处理步骤

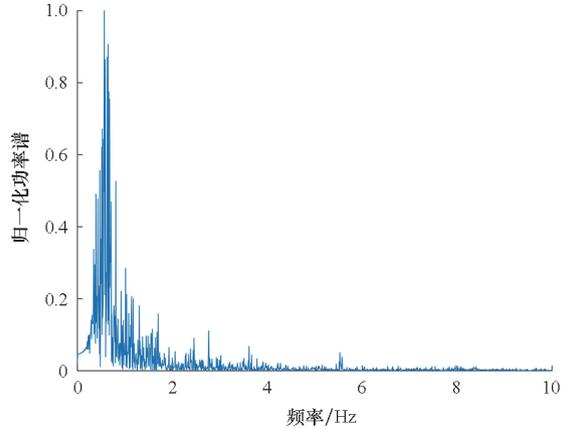
(b) Processing steps

图 9 相干累加与 AR 滤波相结合流程

Fig. 9 Flow chart of the delayed accumulation combined with AR filtering

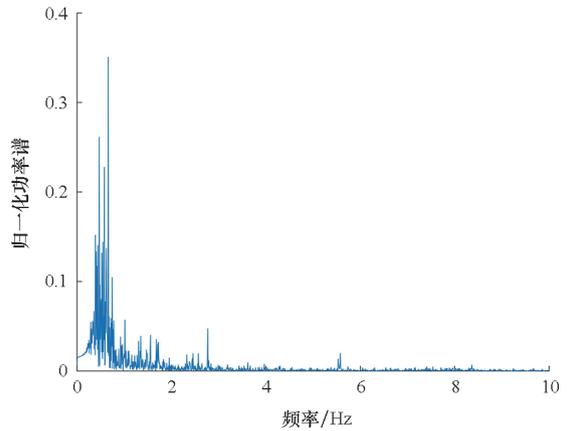
实验算例:

由图 1 可以看出, 舰船中心经过电场传感器的时间大概是在第 240 s, 分别截取六路信号第 100 ~ 120 s 时间段的数据, 按照本文所提出来的方法对截取的信号进行处理, 为了更好地验证本



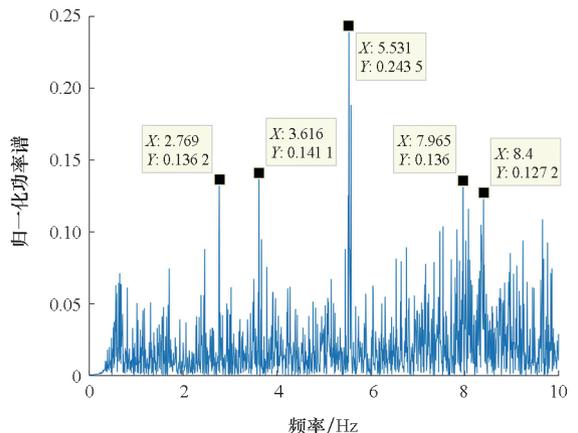
(a) 原信号功率谱

(a) Original signal power spectrum



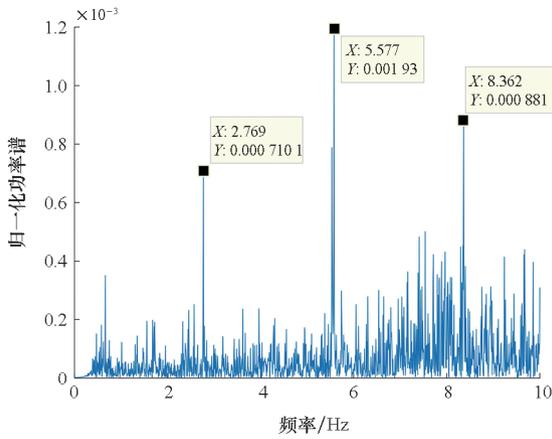
(b) 相干累加后功率谱

(b) Power spectrum after delayed accumulation combined



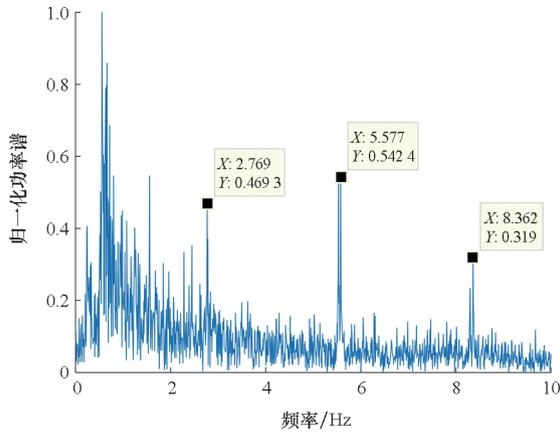
(c) AR 滤波后功率谱

(c) Power spectrum after AR filtering



(d) 相干累加与 AR 滤波相结合后功率谱

(d) Power spectrum after delayed accumulation combined and AR filtering



(e) 自适应线谱增强处理后功率谱

(e) Power spectrum after adaptive line spectrum enhancement processing

图 10 处理前后功率谱

Fig. 10 Power spectrum before and after processing

征,且单独使用相干累加或者 AR 滤波都不能起到很好的抑制噪声谱的作用,经过相干累加与 AR 滤波相结合处理后噪声的功率谱密度值得到了大大的压制,能够明显地分辨出舰船的轴频线谱,通过对比图 10(d)和图 10(e)可以看出,对于 0~1 Hz 频段内的噪声,本文提出的方法比自适应线谱增强的噪声抑制效果要好。

5 结论

本文针对舰船电场信号微弱、特征提取困难的问题,开展电场探测阵列信号处理方法研究,提出了一种基于相干累加和 AR 滤波相结合的舰船电场阵列信号处理方法,并运用本单位研制的电场阵列测量系统所测得的实测数据对该方法的有效性进行了验证,结果表明使用本文提出的方法处理测量得到的电场阵列信号可以在低信噪比条

件下有效抑制背景噪声,提升舰船轴频电场信号的信噪比。

参考文献 (References)

- [1] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 239-240.
LIN C S, GONG S G. Ship physical field[M]. 2nd ed. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007: 239-240. (in Chinese)
- [2] 姜润翔, 陈新刚, 张伽伟, 等. 舰船电场及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
JIANG R X, CHEN X G, ZHANG J W, et al. Ship electric field and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 胡鹏, 龚沈光, 蔡旭东. 自适应线谱增强算法改进及其在轴频电场信号检测中的应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1217-1220.
HU P, GONG S G, CAI X D. Improvement of adaptive line enhancement and its application in detection of ship shaft-rate electric field signal[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1217-1220. (in Chinese)
- [4] 卢新城, 龚沈光, 林春生. 自适应谱线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.
LU X C, GONG S G, LIN C S. Application of adaptive line enhancement on testing the shaft-rate electric field of a ship[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(4): 438-440. (in Chinese)
- [5] 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.
LI S, LU X C, LI J, et al. Extraction of line spectrum of the shaft rate electric field of a ship based on the 11/2-dimension spectrum[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(5): 892-894. (in Chinese)
- [6] 包中华, 于仕财, 龚沈光. 基于小波包分解和滑动功率谱的舰船轴频电场信号检测[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(3): 257-262.
BAO Z H, YU S C, GONG S G. Detection of ship shaft-rate electric field signals based on wavelet packet decomposition and sliding PSD[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(3): 257-262. (in Chinese)
- [7] 谭浩, 包中华, 龚沈光. 基于 AR 预测模型的船舶轴频电场实时检测方法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(3): 96-99.
TAN H, BAO Z H, GONG S G. Real-time detection of shaft-rate electric field of ships based on AR predictive model[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(3): 96-99. (in Chinese)
- [8] 姜润翔, 龚沈光. 基于 AR 模型参数的船舶轴频电场实时检测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(8): 952-956.
JIANG R X, GONG S G. Vessel's shaft-related electric field signal detection based on the AR model parameter[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 952-956. (in Chinese)

- [9] 喻鹏, 程锦房, 张伽伟, 等. 基于 Rao 检测器的舰船轴频电场滑动门限检测方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 827-834.
YU P, CHENG J F, ZHANG J W, et al. Ship shaft-rate electric field sliding threshold detection method based on Rao detector[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 827-834. (in Chinese)
- [10] 杨泱. 一元正态性检验方法比较及应用[J]. 保山学院学报, 2015, 34(5): 85-88.
YANG Y. A summary of univariate normality tests[J]. Journal of Baoshan University, 2015, 34(5): 85-88. (in Chinese)
- [11] 梁小筠. 正态性检验(三)[J]. 上海统计, 2000(12): 24-28.
LIANG X J. Normality test (3)[J]. Shanghai Statistics, 2000(12): 24-28. (in Chinese)
- [12] 李璐. 台阵处理和模板匹配滤波技术在微弱地震信号检测中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2016.
LI L. Study of detecting weak seismic signals with array processing and matched filter techniques [D]. Beijing: Institute of Geophysics China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese)
- [13] 钱隆彦, 陈卫松, 肖梦迪. 基于广义二次互相关的低信噪比信号时延估计[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(1): 93-97.
QIAN L Y, CHEN W S, XIAO M D. Time delay estimation algorithm for low signal-to-noise ratio signals based on generalized quadratic cross correlation [J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(1): 93-97. (in Chinese)
- [14] 张贤达. 现代信号处理[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
ZHANG X D. Modern signal processing [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 段灵修. 基于 ARMA 过程的自发电过滤波方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
DUAN L X. Research on spontaneous EEG filter based on ARMA model[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014. (in Chinese)
- [16] 张珂瑜. 微弱磁异常信号特征分析与检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
ZHANG K Y. Research on characteristic analysis and detection method of weak magnetic anomaly signal [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [17] 张永强, 荆建平, 李亚伟, 等. 基于 AR 模型的转子典型故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(6): 155-160.
ZHANG Y Q, JING J P, LI Y W, et al. A typical rotor fault diagnosis method based on AR model [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6): 155-160. (in Chinese)