

## 感应式磁性天线设计及干扰抑制算法研究\*

李春腾<sup>1</sup>, 蒋宇中<sup>1</sup>, 刘芳君<sup>2</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 李松林<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 云南民族大学 数学与计算机科学学院, 云南 昆明 650500; 3. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 当期望信号和干扰同方向时, 为了有效改善超低频频段的通信质量, 提出了一种基于模拟电路预处理和改进广义旁瓣抵消的干扰抑制算法, 设计了磁性天线、低噪声前置放大电路, 制作了灵敏度较高的磁传感器, 有效地抑制了工频及其谐波干扰。鉴于超低频频段的信号十分微弱, 在广义旁瓣抵消算法的基础上做了几点改进, 为主通道提供较多的参考信息, 从而提高了算法的性能, 有效地解决了传统算法失效的问题。为了验证所提算法的有效性, 在实验室环境下搭建实验平台, 设计了多组对照实验, 实验结果表明: 无论期望信号与干扰是否同方向, 改进后的广义旁瓣抵消算法相比原来的算法, 在信噪比的提升和噪声底限的降低等方面均有较大程度的改善。

**关键词:** 超低频通信; 干扰抑制; 模拟电路; 磁传感器; 广义旁瓣抵消; 盲源分离; 阻塞矩阵

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2019)05-147-06

## Design of search coil magnetic antenna and research on interference suppression algorithm

LI Chunteng<sup>1</sup>, JIANG Yuzhong<sup>1</sup>, LIU Fangjun<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, LI Songlin<sup>3</sup>

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

2. Academy of Mathematics and Computer Science, Yunnan Nationalities University, Kunming 650500, China;

3. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** When the desired signal and the interference are in the same direction, in order to improve the communication quality in the ELF (extremely-low-frequency) communication effectively, a kind of interference suppression algorithm based on analog circuits preprocessing and improved GSC (generalized sidelobe cancellation) algorithm was proposed. The magnetic antennas and preamplifier circuits with lower noise were designed, and the magnetic sensor with high sensitivity was produced, which can suppress 50Hz interference and its harmonic components effectively. In view of the weak desired signal in ELF communication, on the basis of the GSC algorithm, several improvements have been made to provide more reference information about interference for the main channel, which can improve the original GSC algorithm's performance furtherly and address the problem of the traditional algorithm effectively. In order to validate the effectiveness of the proposed algorithm, an experimental platform was set up under the laboratory environment and multiple sets of controlled experiments were performed. Experimental results show that the improved GSC algorithm is better for the improvement of SNR and the noise floor, compared with the original GSC algorithm, regardless of whether the desired signal and the interference are in the same direction.

**Keywords:** extremely-low-frequency communication; interference suppression; analog circuit; magnetic sensor; generalized sidelobe cancellation; blind source separation; blocking matrix

超低频频段的电磁波凭借在海水中衰减较小和具有较强抗干扰能力等优点<sup>[1]</sup>被视作一种可靠的通信方式。然而, 超低频天线属于电小天线, 其辐射效率极低, 即当发射机的输出功率为千瓦级时, 接收机获得的辐射功率不足 1 W, 加之接收频段内面临着较强的背景噪声干扰, 因此超低频通信的信干噪比很低。目前, 有两种技术手段用

于解决上述问题, 即增加发射功率和在接收机后端采用先进的数字信号处理技术。考虑到前者不仅成本高, 而且效果也并不明显。因此, 本文采用后者实现上述目的。

对于干扰抑制算法而言<sup>[2-3]</sup>, 传统的算法主要包括线性滤波<sup>[4]</sup>、信号子空间<sup>[5]</sup>以及广义旁瓣抵消<sup>[6]</sup>等, 它们主要应用于语音信号增强, 在超

\* 收稿日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41631072)

作者简介: 李春腾(1992—), 男, 山东威海人, 博士研究生, E-mail: 249170952@qq.com;

蒋宇中(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: scholarqh@163.com

低频干扰抑制领域应用较少。此外,当期望信号与干扰同方向时,上述传统算法由于参考通道中含有较多的期望信号,在进行干扰抑制时会将主通道中的期望信号部分抵消,从而导致传统干扰抑制算法失效。

鉴于超低频通信的信噪比很低,故本文采用间接估计方式来抑制干扰,即首先估计出干扰,而后将干扰从接收信号中移除。鉴于广义旁瓣抵消算法在语音增强领域展现出了可观的应用前景,为了在期望信号与干扰同方向时实现超低频干扰抑制,本文在该算法的基础上做了以下改进:首先,采用线性滤波代替原来的延时求和波束形成,避免了算法性能受限于天线数量,并将增强后的主信号送至阻塞矩阵<sup>[7]</sup>中进行阻塞,进一步提升了算法对非相干噪声的抑制能力;其次,将盲源分离算法<sup>[8]</sup>引入广义旁瓣抵消算法中,可以在上述情况下,为主通道提供较多的纯净干扰参考信息;再次,考虑到每根天线接收到的信号能量存在一定的差异,如果仅通过原来算法中的简单相减阻塞方式,势必会造成阻塞后输出中残留部分期望信号,进而导致算法性能的恶化,为此,本文通过合理设计磁性天线阵列结构和阻塞矩阵,较大程度地减少了参考通道中期望信号的残留。本文通过上述改进方案,有效地解决了传统算法失效的问题,实现了信号带宽内信噪比增益的提升。此外,本文从感应式磁性天线的测磁原理出发,分析了影响磁性天线灵敏度性能的因素,研制了具有较高灵敏度的感应式磁性天线。为了避免量化噪声以及大气噪声中的工频及谐波干扰影响接收机的性能,设计并制作了低功耗、低噪声的模拟滤波电路。

### 1 整体模型

基于改进的广义旁瓣抵消算法的超低频干扰抑制流程图如图 1 所示。考虑到通信信号十分微弱,为了提高磁性天线对微弱信号的检测能力,本

文对磁性天线的部分参数及结构进行优化设计;之后,考虑到接收机收到的信号中混有较强的工频干扰及其谐波分量,在接收机前端设计了各类滤波模块进行处理;在模拟域对接收信号处理完成后,通过以太网机箱 NI 9184 和数据采集卡 NI 9239 组成的数据采集单元实现模数转换,并通过 NI 9184 上的以太网端口实现采集单元与上位机之间的数据传输,并在上位机中实现干扰数据的实时处理。

#### 1.1 磁性天线

为了实现较高的灵敏度,磁性天线一般由感应线圈和具有高磁导率的磁芯组成。在选择磁芯时,要特别注意磁芯的有效磁导率和磁芯的长度与直径之比。通过对比几种常用软磁材料的性能,本文采用超微晶合金材料作为磁芯,与其他软磁材料相比,其具有较高的磁导率和很好的性价比。

在实际制作磁性天线时,采用以 Z 型绕线方式为主的分段绕线方式,有效地降低了磁性天线的分布电容,并通过电动机自动绕线代替原来的人工手动绕线,有效地提高了绕线效率。为了使绕制的线圈能够固定在磁芯上,将天线放在清漆中浸泡约 24 h,并通过玻璃胶固定亚克力隔板的连接处,待玻璃胶晾干后,便完成了磁性天线的制作。

#### 1.2 模拟滤波电路

模拟滤波电路主要由前置放大电路和各类滤波模块组成,前者的作用是放大前端微弱信号,以便于后续算法处理。通过查阅几种常用运算放大器的使用手册,最终确定本文采用的放大模块为 AD797 运算放大器,在频率低于 1 kHz 时,其具有很低的输入和输出噪声。滤波模块主要用于滤除工频及带宽外的强干扰,虽然开关电容滤波器对上述干扰的滤波效果很好,但其会抬升本底噪声。基于此,本文采用的滤波模块均为有源模块,其通过多个模块级联可以实现高阶模块。最终设计的模拟电路原理图如图 2 所示。

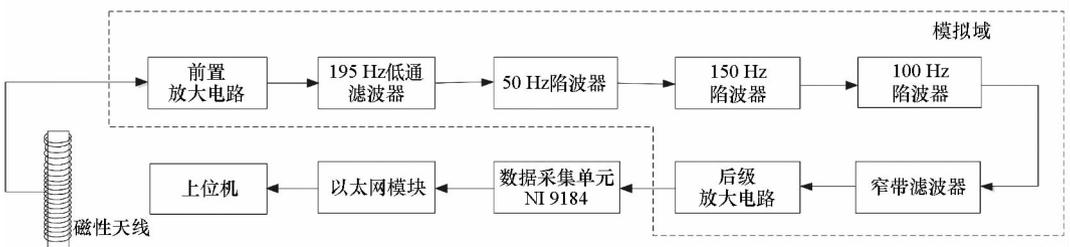


图 1 基于模拟域和数字域结合的整体模型图

Fig. 1 The whole model of interference suppression combining analog domain with digital domain

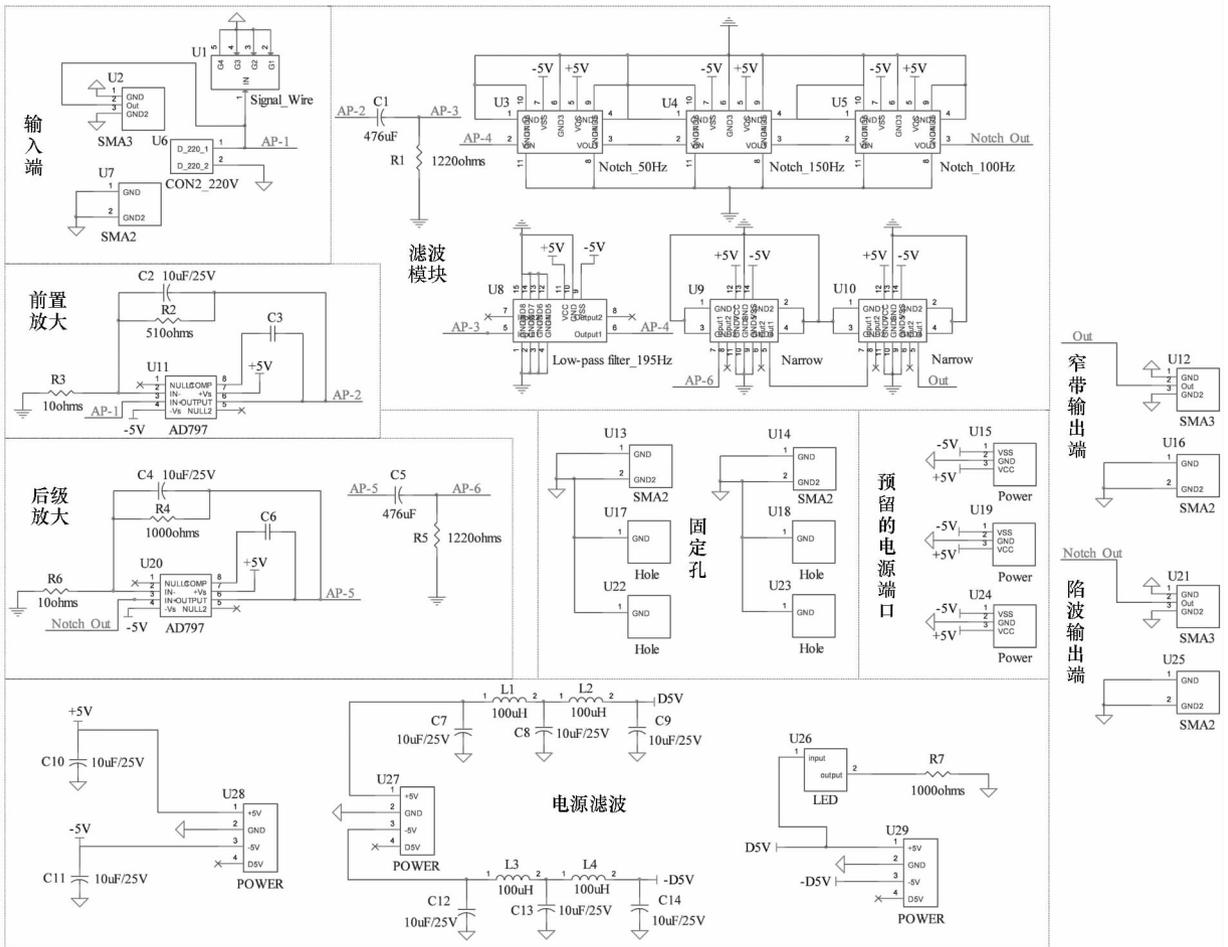


图2 模拟电路原理图

Fig. 2 Schematic structure of designed analog circuits

由于实验室中缺乏测量磁性天线本底噪声的仪器及其缺少有效的屏蔽设施,故只能对制作的磁性天线<sup>[9]</sup>进行定性分析,即在距离磁性天线1 m处,利用两把螺丝刀相互敲打,通过采集到的信号发现,制作的磁性天线能够迅速检测出其产生的磁场。

## 2 改进的广义旁瓣抵消算法

广义旁瓣抵消器 (Generalized Sidelobe Canceller, GSC) 是 Griffith 和 Jim 在 1982 年提出的一种无约束时域自适应波束形成方法<sup>[10]</sup>。从原理上说,它是一个由主通道和辅助通道两部分构成的自适应波束形成器。其中,上方通路是系统的主通道,它主要由一个传统的固定波束形成器构成,原始信号经过该部分处理后可以得到一定的信噪比提升,可以用于消除非相干噪声和散射噪声;下方通路是系统的参考通道,即旁瓣抵消通路,它由阻塞矩阵和自适应滤波器组成。阻塞矩阵被用来抵消输入信号中包含的期望信号成分,使参考通道尽可能不包含期望信号,以便后续

的自适应抵消算法可以在抑制干扰的同时不削弱期望信号,从而改善信噪比和噪声底限。但当期望信号和干扰同方向时,传统的 GSC 算法由于参考通道中含有较多的期望信号而无法实现干扰抑制。因此,本文提出了改进的广义旁瓣抵消算法,其原理框图如图 3 所示。该算法主要通过主信号的预增强以及减少阻塞后的输出中期望信号的残留来实现算法性能的改善。改进的 GSC 算法和

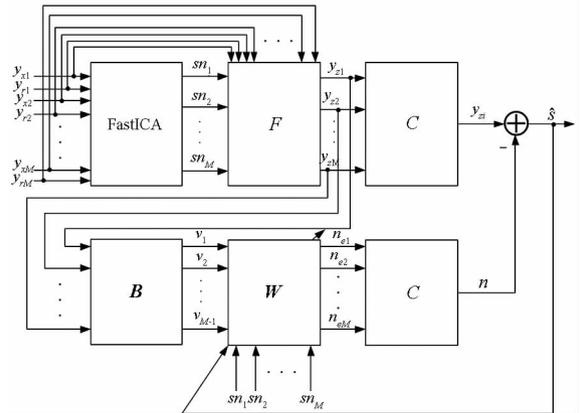


图3 改进的广义旁瓣抵消算法原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of improved GSC

原始的 GSC 算法结构相同,也是由上下两个支路组成,上支路主要实现主天线接收信号的预增强,下支路主要获取不含期望信号的参考干扰信息,从而实现干扰的有效抑制。

假设存在  $M$  个主通道和  $M$  个参考通道,利用 FastICA 算法<sup>[11]</sup>对接收的主通道序列  $y_{x1}, y_{x2}, \dots, y_{xM}$  和参考通道序列  $y_{r1}, y_{r2}, \dots, y_{rM}$  进行盲源分离,挑选出分离后不含期望信号的序列  $sn_1, sn_2, \dots, sn_M$ , 将其与主通道和参考通道序列送至模块  $F$  中进行分组,使得分组后的序列仅含 1 路主天线接收到的信号,其余全部为参考信号(该参考信号由参考序列和分离后的序列组成),即  $\mathbf{R}_i = [y_i, y_{ij}, \dots, y_{ij+p}, sn_l, \dots, sn_{l+m}]$ ,  $1 \leq i, j, l \leq M, p + m = M - 3$ 。将分组后的序列通过基于最小均方误差准则设计的最优滤波器,求解得到滤波系数的近似解,任意一路最优滤波器的权值系数可表示为:

$$\mathbf{W}_{opt,i} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} E[\mathbf{n}(k) \cdot y_i(k)] \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{n}(k) = [y_{ij}(k); \dots; y_{ij+p}(k); sn_l(k); \dots; sn_{l+m}(k)]_{(M-1) \times N}$ ,  $N$  表示接收序列中包含的数据点数,  $\hat{\mathbf{R}}$  表示参考通道的协方差矩阵,  $k$  表示采样点数索引。由此,将增强后的接收信号序列  $y_{z1}, y_{z2}, \dots, y_{zM}$  经过模块  $C$  的选择后,可以得到任意一路增强后的信号,其可表示为:

$$y_{zi}(k) = y_i(k) - \mathbf{W}_{opt,i}^T \mathbf{n}(k) \quad (2)$$

考虑到超低频频段的电磁波在自由空间中的衰减较小,因此,由摆放间距造成的接收信号差异基本可以忽略不计。但通过分析采集到的数据发现,各路天线接收到的信号能量存在些许差异,其原因主要有以下两个方面:一方面,发射期望信号的线圈难以与两根主天线完全垂直,导致期望信号在 2 根主天线上的投影不同;另一方面,磁性天线和模拟滤波电路的制作工艺有限,难以保证每根天线的参数和每片电路板的增益完全相同。因此,采用原来的阻塞矩阵势必会造成参考通道中残留期望信号,从而降低算法的性能。为有效解决上述问题,本文设计的阻塞矩阵形式为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \beta_2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \beta_{M-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\beta$  为待解的阻塞系数,代价函数采用基于分析频带内的信噪比最小的准则,即

$$\begin{cases} \min SNR(\mathbf{b}_i \mathbf{Y}_{opt}, f) \\ \text{s. t. } T_l < \beta_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{b}_i$  为阻塞矩阵  $\mathbf{B}$  的第  $i$  行;  $\mathbf{Y}_{opt} = [y_{opt,1},$

$y_{opt,2}, \dots, y_{opt,M}]^T$ , 上标  $T$  表示矩阵的转置运算;  $T_l$  为设定的控制参数,用于控制  $\beta$  的调整范围。  $SNR(y, f)$  表示接收序列  $y$  在频率  $f$  处的信噪比(单位为 dB),其可表示为:

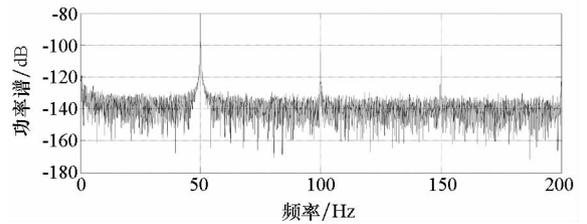
$$SNR(y, f) = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (5)$$

其中,  $P_s$  表示期望信号功率,  $P_n$  表示噪声功率。式(5)也是本文采用的算法性能评价指标。

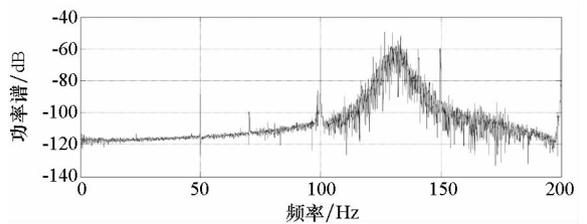
经阻塞矩阵处理后的序列  $v_1, v_2, \dots, v_{M-1}$  中几乎不含期望信号,其与分离后的序列  $sn_1, sn_2, \dots, sn_M$  组成新的参考通道序列,将该序列送至自适应滤波器,该滤波器采用最小二乘算法<sup>[12]</sup>进行滤波系数  $\mathbf{W}$  的求解,从而得到干扰估计序列  $n_{e1}, n_{e2}, \dots, n_{eM}$ , 将该估计序列通过模块  $C$  的选择后,可以得到与主通道信号对应的干扰估计,通过两者相减,最终得到估计的期望信号  $\hat{s}$ 。

### 3 实验与结果分析

为了测试模拟滤波电路对工频干扰及其谐波分量的抑制效果,利用示波器 TDS 3012B 获取处理前后的信号波形图,其结果如图 4 所示。实验结果表明:本文设计的模拟滤波电路有效地抑制了工频干扰及其谐波分量。



(a) 模放电路处理前的信号频谱图  
(a) Signal spectrum before analog circuits



(b) 模拟电路处理后的信号频谱图  
(b) Signal spectrum after analog circuits

图 4 工频及谐波干扰抑制效果图  
Fig. 4 Effect of analog circuits on suppressing the 50 Hz and its harmonic components

为了测试所提算法在实际大气环境中的应用效果,在实验室中搭建实验平台,磁性天线接收装置结构示意图如图 5 所示,其中①和③的天线为主天线,②和④的天线为参考天线。

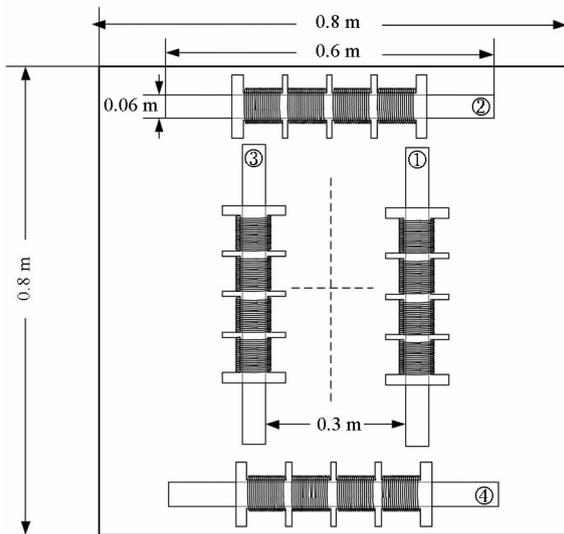


图5 磁性天线接收装置结构示意图  
Fig.5 Illustration of receive equipments composed by magnetic antennas

利用设计的磁性天线和模拟滤波电路接收环境中的电磁信号,从结构上来看,接收阵列中采用的磁性天线和模拟滤波电路板基本一致,为尽量减小主天线接收到的信号幅度差异,设置2根主天线的距离相对较近。期望信号和强干扰的具体采集方案为:信号发生器 AFG3021 产生频率为 130 Hz、幅度为 30 mV 的信号作为期望信号,并通过连接线将其送至发射线圈 1,该线圈距离接收装置约 5 m;函数发生器 DG1022U 产生幅度为 5 V 的宽带高斯白噪声,并将其送至信号发生器 GFG-8016G 中进行相位调制,通过连接线将调制后的信号送至发射线圈 2,以此作为强干扰,线圈 2 与接收阵列的中心成 45° 水平角,距离该中心约 1.5 m。设置数据采集单元的采样频率为 5 kHz,采集时间为每组数据 30 s。为了避免接收信号中引入额外的工频干扰,数据采集单元和模拟滤波电路板均采用蓄电池供电。下面分别进行 3 组实验来验证所提算法的有效性。

**实验 1:**以通道 1 作为参考,线圈 1 位于通道 1 指向的前方,线圈 2 位于接收阵列的 45° 方向,干扰抑制效果如图 6 所示。

**实验 2:**线圈 1 的位置和线圈 2 的位置相同,即处于接收阵列的 45° 方向,干扰抑制结果如图 7 所示。

从图 6 和图 7 实验结果来看,GSC 算法在期望信号和干扰不同方向时具有一定的干扰抑制效果,信噪比和噪声底限分别改善 13.94 dB 和 16.57 dB,而在两者方向相同时算法性能明显下降,信噪比和噪声底限分别改善 1.60 dB 和

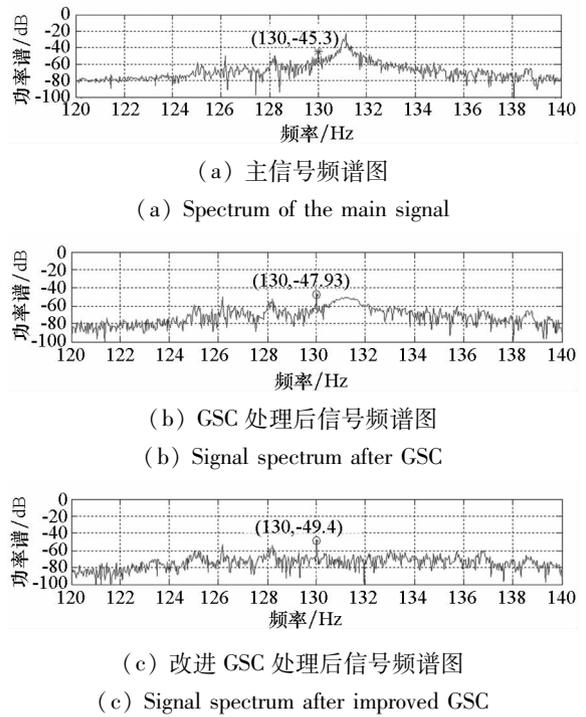


图6 信号与干扰处于不同来向时的干扰抑制结果图  
Fig.6 Results of interference suppression with the different direction between signal and interference

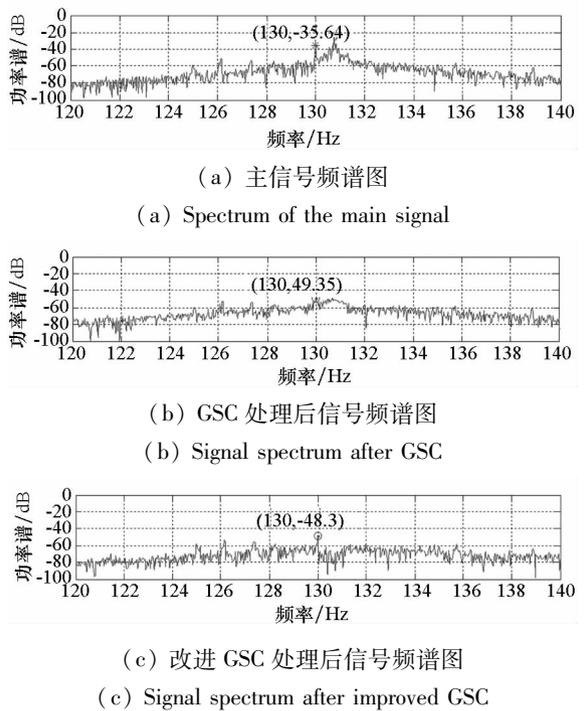
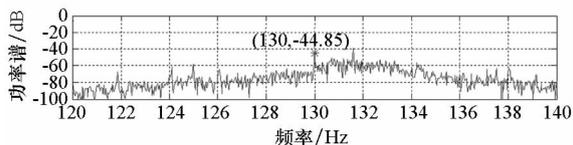


图7 信号与干扰处于同一来向时的干扰抑制结果图  
Fig.7 Results of interference suppression with the same direction between signal and interference

15.31 dB;而改进的 GSC 算法在上述两种情况下均取得较好的干扰抑制效果,在期望信号和干扰不同方向时,信噪比和噪声底限分别改善 22.21 dB和26.31 dB;而在同方向时,信噪比和噪声底限分别改善 16.03 dB 和 10.90 dB。该实验

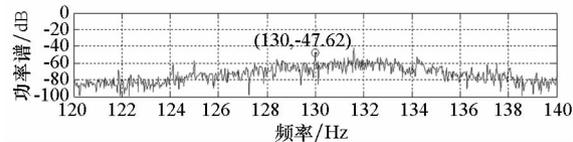
结果与第 2 节的理论推导相吻合,即一方面,盲源分离算法为主通道提供较多的参考信息;另一方面,通过调整主通道接收天线之间的距离以及优化阻塞矩阵,使得主通道上接收到的信号能量差异较小,这在很大程度上减少了参考通道中残留的期望信号,从而使算法在期望信号与干扰同方向时依然有效。这也证实了本文所提的改进算法的有效性。

**实验 3:**关闭  $45^\circ$  方向的随机调相干扰,启动绕线时采用的电动机,将其放置在接收序列的  $45^\circ$  方向,距离接收装置 1 m,通过电动机模拟超低频接收机中的任意干扰源来进一步验证所提改进算法的有效性,通过示波器 TDS 3012B 观测电动机开启前后接收信号的变化,转动开关控制器调节电动机的转速,使干扰源处于频带范围内,干扰抑制结果如图 8 所示。



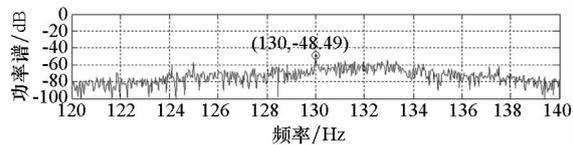
(a) 主信号频谱图

(a) Spectrum of the main signal



(b) GSC 处理后信号频谱图

(b) Signal spectrum after GSC



(c) 改进 GSC 处理后信号频谱图

(c) Signal spectrum after improved GSC

图 8 电机干扰抑制结果图

Fig. 8 Results of interference suppression caused by motor

由图 8 可知,GSC 算法对电机干扰抑制效果很差,几乎完全失效,而改进的 GSC 算法对电机干扰的抑制效果较好,信噪比和噪声底限分别改善 6.86 dB 和 3.22 dB,但比人工随机调相干扰的抑制效果差,原因主要是电机干扰的频谱在频带范围内不断波动,使频带内的噪声底限明显抬高,且没有明显的干扰峰值,这使得改进算法对非相干噪声的抑制能力有所减弱。因此,算法对其的抑制效果要差于人工随机调相干扰。通过电机干扰实验进一步证实了改进算法的有效性。

## 4 结论

本文从提高超低频微弱信号的检测能力和改善干扰抑制效果两方面着手,设计了灵敏度较高的磁传感器,给出了磁性天线及模拟电路的设计制作流程;在广义旁瓣抵消算法的基础上,将盲源分离算法引入至改进的广义旁瓣抵消算法中,为主通道提供了较多的参考信息,有效地改善了算法在期望信号和干扰同方向时的性能,并在实验室环境下设置多组算法性能测试实验,结果表明:模拟滤波电路能够有效地抑制工频干扰及其谐波分量,相比于原始的 GSC 算法,无论期望信号与干扰源是否处于同一方向,改进后的 GSC 算法均在较大程度上提升了信号带宽内的 SINR 增益,有效地改善了超低频通信的通信质量。

## 参考文献 (References)

- [1] Ying W W, Jiang Y Z, Liu Y L, et al. A blind detector for Rayleigh flat-fading channels with non-Gaussian interference via the particle learning algorithm [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(12): 1068 - 1071.
- [2] 范广腾,倪少杰,唐小妹,等. 非理想信道下测量零值无偏干扰抑制滤波器设计[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(2): 123 - 127.  
FAN Guangteng, NI Shaojie, TANG Xiaomei, et al. Zero bias anti-jamming filter design in non-ideal channel [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(2): 123 - 127. (in Chinese)
- [3] 陈素根,吴小俊. 基于特征值分解的中心支持向量机算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 557 - 564.  
CHEN Sugeng, WU Xiaojun. Eigenvalue proximal support vector machine algorithm based on eigenvalue decomposition (decomposition) [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(3): 557 - 564. (in Chinese)
- [4] Jamali V, Ahmadzadeh A, Schober R. On the design of matched filters for molecule counting receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1711 - 1714.
- [5] Jensen J R, Benesty J, Christensen M G. A class of optimal rectangular filtering matrices for single-channel signal enhancement in the time domain [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2013, 21(12): 2595 - 2606.
- [6] Gannot S, Vincent E, Markovich S, et al. A consolidated perspective on multimicrophone speech enhancement and source separation [J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, 25(4): 692 - 730.
- [7] Liu W, Weiss S, Hanzo L. A subband-selective broadband GSC with cosine-modulated blocking matrix [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(3): 813 - 820.

(下转第 158 页)

- [10] 陆风波, 黄知涛, 易辉荣, 等. 一种基于高阶累积量的数字调相信号识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1611 - 1615.  
LU Fengbo, HUANG Zhitao, YI Huirong, et al. Recognition algorithm of phase shift keying signals by higher-order cumulants[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9): 1611 - 1615. (in Chinese)
- [11] 魏阳杰. 基于循环谱的调制样式识别与参数估计[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
WEI Yangjie. Modulation recognition and parameter estimation based on cyclic spectral density[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- 
- (上接第 152 页)
- [8] Comon P, Jutten C, Hérault J. Blind separation of sources, part II: problems statement[J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 11 - 20.
- [9] 朱万华, 底青云, 刘雷松. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3683 - 3689.  
ZHU Wanhua, DI Qingyun, LIU Leisong. Development of search coil magnetometer based on magnetic flux negative feedback structure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3683 - 3689. (in Chinese)
- [10] Griffiths L, Jim C. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(1): 27 - 34.
- [11] 方民权, 周海芳, 张卫民, 等. GPU 上高光谱快速 ICA 降维并行算法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(4): 65 - 70.  
FANG Minquan, ZHOU Haifang, ZHANG Weimin, et al. A parallel algorithm of FastICA dimensionality reduction for hyperspectral image on GPU [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(4): 65 - 70. (in Chinese)
- [12] Benesty J, Paleologu C, Ciochina S. Regularization of RLS algorithm [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, 2011, E94 - A(8): 1628 - 1629.