

基于多传感器的微弱磁异常信号提取方法研究*

黄朝^{1,2} 许鑫¹ 刘敦歌^{1,2} 张晓娟¹ 方广有¹

(1. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 针对磁异常探测(magnetic anomaly detection, MAD)问题,许多学者提出了相应的检测方法。检测只能判断目标存在与否,而为了实现目标定位和识别需要获取异常信号本身。通过建立机载磁异常信号提取模型,基于卷积盲源分离(convolution blind source separation, CBSS)理论,提出频域相关提取算法实现异常信号提取。仿真实验结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 磁异常探测;机载信号提取模型;卷积盲源分离;频域相关提取

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Extraction method of weak magnetic anomaly signal based on multi-sensor

Huang Chao^{1,2} Xu Xin¹ Liu Dunge^{1,2} Zhang Xiaojuan¹ Fang Guangyou¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to solve the problem of magnetic anomaly detection (MAD), many scholars have proposed the corresponding detection methods. These methods can only detect the presence or absence of the target, while obtaining anomaly signal itself can achieve the goal of locating and identifying the target. In this paper, the magnetic anomaly signal extraction model based on airborne platform and the frequency-domain correlation extraction algorithm based on convolution blind source separation (CBSS) are proposed. The extraction of weak magnetic anomaly signal is implemented. Simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: magnetic anomaly detection (MAD); signal extraction model; convolution blind source separation; frequency-domain correlation extraction

1 引言

磁异常探测是探测隐藏铁磁目标的有效方法^[1-3]。铁磁目标在地磁场中被磁化产生准静态磁场,将铁磁目标等效为磁偶极子,异常信号幅值在目标周围以半径的负三次方衰减,被动探测信号能量微弱、时域上瞬变,易受地磁场背景噪声强烈干扰,信号探测和获取是一项难题。基本的信号处理方法难以解决低信噪比的问题^[4-7]。为了探测隐蔽的铁磁目标,涌现出了多种MAD探测方法^[8-10],例如标准正交基(orthogonal basis function, OBF)-匹配检测、信息熵检测、高阶零点交叉检测(high-order crossing, HOC)和经验模态分解。上述方法仅有检测判定目标存在与否的作用,不能获得异常信号磁场值信息。为了对目标定位以及识别,需尽可能提取信号磁场信息。因地磁场背景噪声有良好的相关度,该文通过建立多传感器测量的时间差模型,利用卷积盲源分离理论,提出频域相关提取算法,在运动平

台上实现磁异常信号提取。该方法获取的信号增加了信息量,相较于梯度仪来说,加强了定位和识别的反演约束信息。

2 卷积盲源分离理论

对于时域和频域均受到强干扰的信号,经典滤波算法难以奏效,基于统计理论的信号处理显得重要。在现实环境中,传感器通常会接收到多个信号的混合信号,为了分离各成分,20世纪80年代提出了盲源分离算法,后来发展到卷积盲源分离^[11-12]。在多传感器信号处理中,假设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为 n 个传感器测得的信号向量,每个观测元素由 m 个信号源 $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)^T$ ($n \geq m$)的线性卷积混合而成,信号源相互统计独立,线性模型为:

$$x(t) = \sum_{\tau=0}^p A(\tau)s(t-\tau) + n(t) \quad (1)$$

收稿日期:2015-01

* 基金项目:国家自然科学基金(41374186)、国家863计划(2014AA093407)资助项目

式中： P 为卷积的阶数， $A(\tau)$ ($A(\tau) \in (a_{ij})^{n \times m}$)为混合系数(未知)， $n(t)$ 为各传感器独立噪声。为简化问题，取 $m = n$ 。式(1)可写成：

$$x(t) = A(t)s(t) + n(t)$$

卷积盲源分离即为了寻找解混矩阵 $W(t)$ ，估计出最佳源信号，数学过程为：

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^Q W(\tau)x(t-\tau) = W(t)A(t)s(t) = \hat{s}(t) \quad (2)$$

但分离出的 $y(t)$ 和 $s(t)$ 仅有相同的波形，时延不确定。信号分离需满足条件：1)信号源 $s(t)$ 之间统计独立；2)混合矩阵 $A(t)$ 满秩。一种去相关方法的分离步骤为：

1)时域卷积在频域上为乘积，将式(1)变换到频域，再求平均互相关函数：

$$x(\omega, t) = A(\omega)s(\omega, t) + n(\omega, t) \quad (3)$$

$$\bar{R}_{xx}(\omega, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(\omega, t) x^H(\omega, t) \quad (4)$$

$$\bar{R}_{xx}(\omega, t) = A(\omega, t)\Lambda_s(\omega, t)A^H(\omega, t) + \Lambda_n(\omega, t) \quad (5)$$

式中： $x(\omega, t) = \sum_{\tau=0}^{T-1} e^{-j2\pi\omega\tau/T} x(t+\tau)$ (T 为时间窗长度)。

2)使相关函数的估计值和真实值误差最小，误差量为式(6)，得到代价函数式(7)：

$$E(\omega, k) = W(\omega)[\bar{R}_{xx}(\omega, k) - \Lambda_n(\omega, k)]W^H(\omega) - \Lambda_s(\omega, k) \quad (6)$$

$$\operatorname{argmin}_{W_1(\omega)=1} J(\hat{W}, \hat{\Lambda}_s, \hat{\Lambda}_n) = \sum_{\omega=1}^T \sum_{k=1}^K \|E(\omega, k)\|^2 \quad (7)$$

3)为优化代价函数，式(7)分别对各分量求偏导数得到梯度：

$$\frac{\partial J}{\partial W^*(\omega)} = 2 \sum_{k=1}^K E(\omega, k)W(\omega)[\bar{R}_{xx}(\omega, k) - \Lambda_n(\omega, k)] \quad (8)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Lambda_s^*(\omega, k)} = -\operatorname{diag}E(\omega, k) \quad (9)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Lambda_n^*(\omega, k)} = -\operatorname{diag}[W^H(\omega)E(\omega, k)W(\omega)] \quad (10)$$

利用梯度式构造迭代条件，能得到最优解。

3 磁异常信号提取

3.1 信号提取模型

机载磁异常探测运动平台上，测量信号含有平台运动磁噪声、海浪噪声和地磁场噪声。平台运动磁噪声利用磁补偿方法做补偿^[13-14]，海浪噪声基于 Weaver 海浪磁场模型进行自适应消除^[15]，而地磁背景噪声在运动平台上难以找到参考测量点对消。磁异常目标异常为局部异常，异常信号在目标周围按照半径的负三次方衰减；地磁场背景噪声脉动来源于电离层的粒子运动，在几~几百 km 范围内都具有高度相关性。该文提出机载多传感器系统，传感器数目为两个及以上，用以消除地磁背景噪声。两个磁场感

器安装在飞行平台上，信号采集过程如图 1 所示，两传感器的连线和探测路径平行，传感器间距 10~15 m，探测路径下方为铁磁目标，设传感器 1、2 测得的信号分别为 $B_{T1}(t)$ 、 $B_{T2}(t)$ ，表示为：

$$B_{T1}(t) = B(t) + B_e(t) + n_{s1}(t) \quad (11)$$

$$B_{T2}(t) = B(t - t_0) + B_e(t) + n_{s2}(t) \quad (12)$$

式(11)、(12)中， $B(t)$ 为磁异常信号， $B(t - t_0)$ 为延时信号(t_0 无法先验准确获得)， $B_e(t)$ 为地磁场背景噪声， $n_{s1}(t)$ 、 $n_{s2}(t)$ 分别为独立噪声(传感器本底微噪声、测量偏差等)。

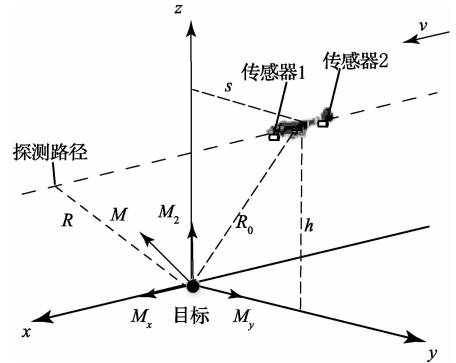


图 1 机载磁异常探测

将式(12)写为卷积形式：

$$B_{T2}(t) = h(t) * B(t) + B_e(t) + n_{s2}(t) \quad (13)$$

联合式(11)和(13)，应用卷积盲源分离得到 $B(t)$ 的波形，并通过下述的频域相关提取算法实现原始信号提取。为了验证信号模型是否满足满秩性，将式(11)、(13)变换到频域写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} B_{T1}(\omega) \\ B_{T2}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ h(\omega) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(\omega) \\ B_e(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{s1}(\omega) \\ n_{s2}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$D(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ h(\omega) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{-j\omega t_0} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\operatorname{rank}(D(\omega)) = 2$ ，满足分离条件。

3.2 频域相关提取算法

在获得与原始信号相似的波形后，需基于波形恢复原始信号。在信号提取中，为了从混合信号中提取相应成分，自适应算法(时域)提取难以调整参数和收敛，可在频率域基于相关准则进行。信号 $u(t)$ 和 $v(t)$ 均为时间序列， $u(t)$ 由多种信号卷积混合构成， $v(t)$ 为已知的与 $u(t)$ 中某信号成分在波形上相似，表达式为：

$$u(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t)u_i(t) \quad (15)$$

$$v(t) = u_k(t), k = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中： $u_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)相互统计独立， $h_i(t)$ 为线性卷积核函数(未知)。为了提取 $u(t)$ 中的成分 $h_k(t)u_k(t)$ ，对 $u(t)$ 和 $v(t)$ 求互相关函数，变换到频域：

$$R_{uv}(\tau) = h_k(\tau)R_{u_k u_k}(\tau) \quad (17)$$

$$S_{uv}(\omega) = h_k(\omega)S_{u_k u_k}(\omega) \quad (18)$$

$$h_k(\omega) = \frac{S_{uv}(\omega)}{S_{u_k u_k}(\omega)} = \frac{S_{uv}(\omega)}{S_{v_v}(\omega)} \quad (19)$$

式中: $S_{uv}(\omega)$ 为 $u(t)$ 和 $v(t)$ 的互功率谱密度函数, $h_k(\omega)$ 为 $h_k(t)$ 的傅里叶变换, $S_{u_k u_k}(\omega)$ 为 $u_k(t)$ 的自功率谱密度函数。提取结果写为:

$$h_k(t)u_k(t) = F^{-1}(h_k(\omega)V(\omega)) \quad (20)$$

式中: $V(\omega)$ 为 $v(t)$ 的傅里叶变换。该频域提取方法的优点在于能在频域实现自适应。

4 数据处理和方法分析

4.1 数据处理

针对信号提取模型(见 3.1 节), 信号处理的主要工作为成分分离和提取, 独立噪声部分含有传感器噪声、测量偏差等, 量级低于磁异常信号, 但会影响分离算法性能。传感器自身噪声在 $0.1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平, 磁异常信号在 nT 级, 地磁场背景噪声抖动处于 nT 级以上, 对各部分做功率谱估计, 再利用谱减法尽可能消除独立噪声。信号处理流程如图 2 所示, 主要环节为独立噪声消除、成分分离和提取。首先利用谱减法去除独立噪声; 其次做成分分离; 再经过成分匹配, 从测量信号中利用式(20)获得原始信号最佳估计。

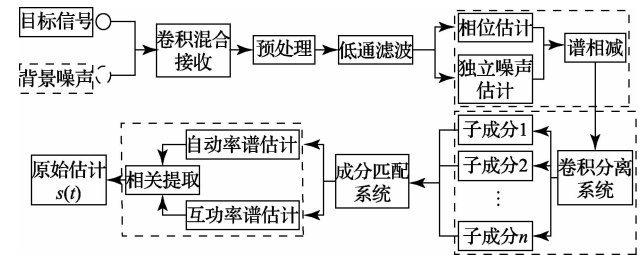
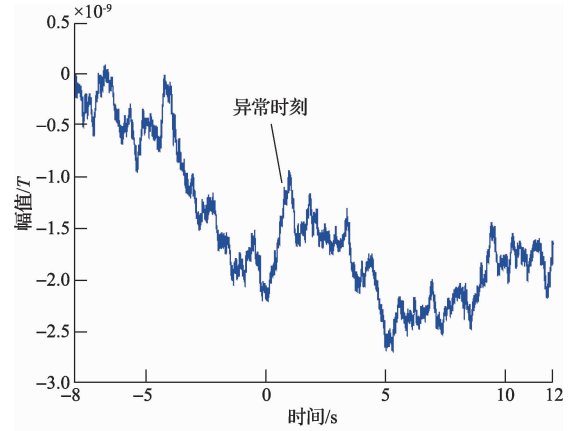


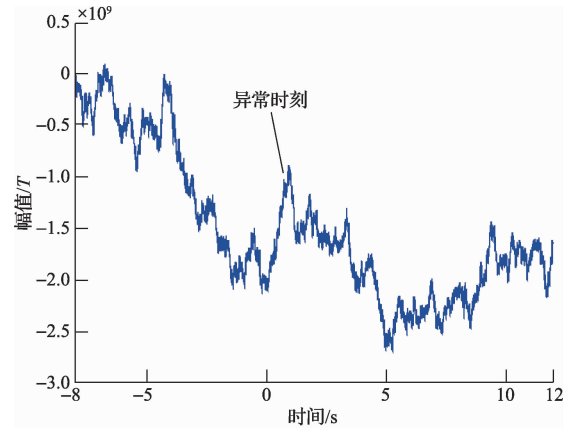
图 2 信号提取流程

运动平台仿真参数设置中, 巡航时速设置为 550 km/h , 传感器间距为 15 m , 采样率为 2000 Hz , 信噪比 $\text{SNR} = -13 \text{ dB}$ 。据图 1, 磁异常信号形成时间差, 测得的原始数据如图 3 所示, (a)、(b)分别为传感器 1 和传感器 2 的数据(时间轴正负对应坐标系), 磁异常目标的信号被淹没。因构造的机载多传感器系统形成时间差, 地磁场噪声具有相关性, 恰好满足了卷积盲源分离算法要求。地磁场噪声属于 $1/f^\alpha (\alpha \in (1, 2))$ 噪声, 基于多传感器的测量系统比单传感器信息量大, 能利用成分间的相互信息结合统计算法进行提取。式(11)、(13)可写成卷积盲源分离的形式, 利用平台运动时速和采样率的先验知识, 估计式(12)中 t_0 的范围, 根据 t_0 的取值范围设置式(2)中分离滤波器 W 的长度, 减少迭代时间。

经卷积盲源分离可得出分离结果, 如图 4 所示, 分离出的异常信号和原始异常信号(经幅度缩放和时延平移)波形相似, 但分离结果的幅度和时延不能确定。分离结果波形相似, 表明磁异常信号提取模型有效。

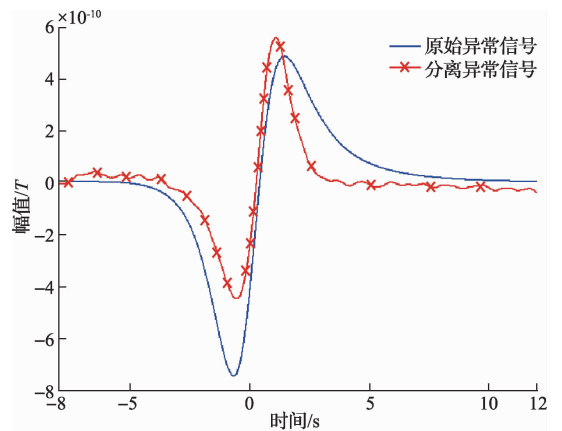


(a)传感器1的原始数据



(b)传感器2的原始数据

图 3 传感器采集的原始信号



(a)分离的异常信号

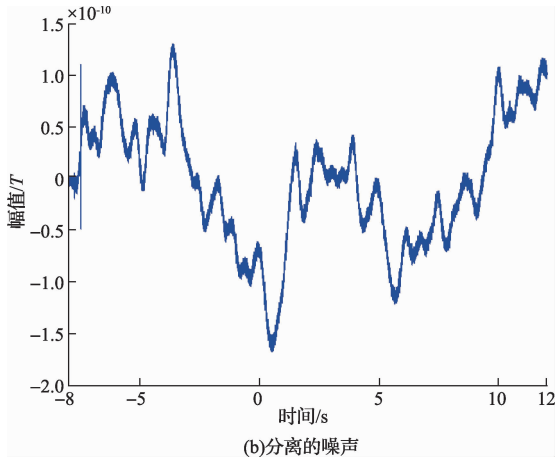
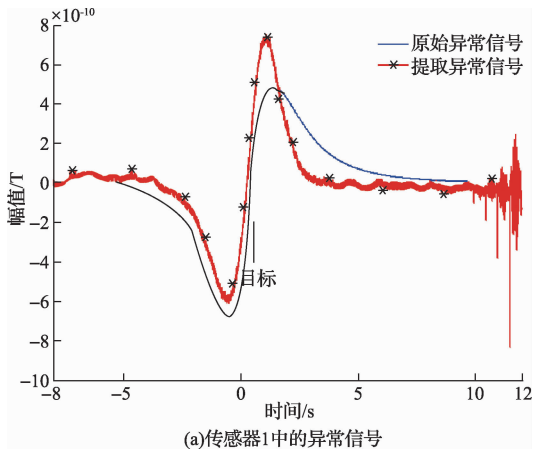
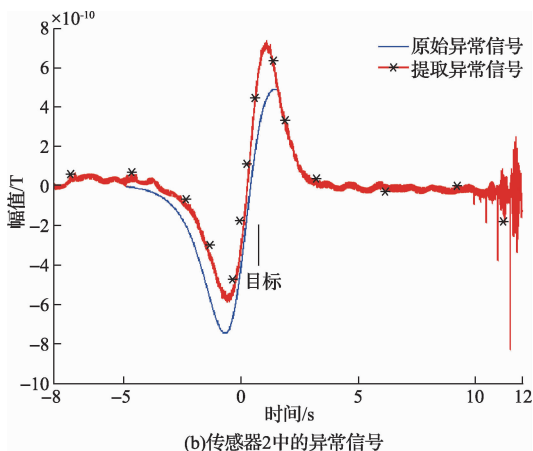


图4 分离结果

分离算法本身无法实现原始信号提取,将图4(a)中分离的异常信号波形用式(19)进行原始信号提取。图5显示了原始异常信号和提取的异常信号,(a)为传感器1中的异常信号,(b)为传感器2中的异常信号,由于飞行速度快,两传感器中异常信号的时间差很短。



(a)传感器1中的异常信号



(b)传感器2中的异常信号

图5 提取的异常信号结果

4.2 方法分析

磁异常信号信噪比通常在0 dB以下,地磁场背景噪声属于 $1/f^\alpha$ 噪声,信号处理有极大困难。在检测方法中,基于单传感器的OBF检测、HOC和信息熵等方法抗 $1/f^\alpha$ 噪声能力弱。实际的噪声环境在统计上不稳定,自适应对消技术在周期信号提取中效果较好,但滤波器系数难以调整到收敛,磁异常信号属于非周期信号,针对地磁场背景噪声的自适应消除效果不佳;将式(11)和(12)相减,等效为在 x 轴上的梯度功能,梯度差分丢失了磁场值信息,对于目标定位和识别中的反演算法减少了约束信息。梯度仪探测中,梯度仪具有消除背景噪声的作用,但梯度仪测试的数据按照 r^{-4} (r 为半径)衰减、仅含有磁场值的差分信息,而该文中的多传感器信号提取模型,测试异常值按照 r^{-3} 衰减,在较高信噪比下保留了磁场值信息。地磁场在几~几百 km范围内均有良好相关性,但通过地面参考消除背景噪声能力有限,基于运动平台的远参考方法难实现。

多传感器之间存在互信息可利用,该文利用了背景噪声的物理相关性,结合机载模型和算法的特点,实现了提升抗噪声能力的磁异常原始信号提取。将两传感器的测量信号相减等效于获得磁场在 x 轴上的梯度值,而该文方法能进一步提取到目标磁场值信息,增加了目标的磁场特征,对于定位和识别的反演算法有约束作用。

5 结论

磁异常探测距离受到地磁场背景噪声的制约,该文针对机载运动平台上的磁异常探测,利用多传感器构造了获取磁异常信号的时间差模型,基于卷积盲源分离理论,对可解性作了必要的分析,提出频域相关提取算法。仿真实验结果表明,本文方法能够在信噪比为负的情况下实现微弱信号提取,信噪比提升20 dB以上。相对于常规梯度仪的功能来说,增加了目标的磁场值特征,有利于目标定位和识别。在今后的研究中,要针对传感器测量的独立噪声对信号提取性能的影响给出定量关系;针对地磁场背景噪声和异常目标信号的特征寻找变换函数,在最佳变换域进行成分分离。

参考文献

- [1] TIAN Z X. Underwater magnetic surveillance system for port protection[C]//2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE). IEEE, 2011, 1: 282-285.
- [2] KEENAN S T, BLAY K R, ROMANS E J. Mobile magnetic anomaly detection using a field-compensated high-Tc single layer SQUID gradiometer [J]. Superconductor Science and Technology, 2011, 24(8): 085019.

- [3] SONG S, QIAO W, LI B, et al. An efficient magnetic tracking method using uniaxial sensing coil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1): 1-7.
- [4] 徐超. 基于形态滤波和提升小波变换的漏磁信号处理研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 23-25.
- [5] 郭莹, 侯明云. 基于指数梯度和凸组合的稀疏自适应滤波算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 894-900.
- [6] 王新, 王乾. 改进的 Hilbert-Huang 变换方法及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1369-1375.
- [7] 刘彩云. 基于小波变换的位场场源识别与异常分离方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [8] SHEINKER A, FRUMKIS L, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using a three-axis magnetometer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 160-167.
- [9] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1095-1103.
- [10] ZHAO L H, XU X Q. Detection of weak magnetic anomaly signal using EMD [J]. Advanced Materials Research, 2014, 926: 1779-1782.
- [11] 李志农, 张芬, 何旭平. 基于小波-KCCA 的非线性欠定盲分离方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 601-606.
- [12] NION D, MOKIOS K N, SIDIROPOULOS N D, et al. Batch and adaptive PARAFAC-based blind separation of convolutive speech mixtures[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2010, 18(6): 1193-1207.
- [13] 寇义民. 地磁导航关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [14] 李季, 潘孟春, 罗诗途, 等. 半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2147-2152.
- [15] 邓鹏, 林春生. 基于 LMS 算法的自适应滤波器在海浪磁场噪声中的应用[J]. 电子测量技术, 2009, 32(12): 58-60.

作者简介

黄朝, 1988 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为磁异常信号处理。

E-mail: huangzhao19880507@163.com

许鑫, 1986 年出生, 助理研究员。主要研究方向为低频电磁探测。

E-mail: xinxu9527@gmail.com

张晓娟, 1964 年出生, 研究员, 博士生导师。主要研究方向为微波遥感、天线、计算电磁学、电磁散射与逆散射。

E-mail: xjzhang@mail. ie. ac. cn

(上接第 90 页)

参考文献

- [1] 王昊, 陈仁文. 基于 SP37 和 MSP430 的汽车轮胎压力监测系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 67-71.
- [2] 张洪财, 肖文光. 基于 SP37 和 MAX1473 的胎压监测系统的设计[J]. 电子产品世界, 2011, 18(11): 59-60.
- [3] 于良杰, 马建辉. 集成 TPMS 功能的电动汽车仪表盘设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(4): 150-151.
- [4] 黄友, 张向文. 基于 SP37 的轮胎压力监测系统的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2013(12): 144-147.
- [5] 冷毅, 李青侠. 基于无线传感器和 CAN 总线的直接式轮胎压力监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 711-717.
- [6] 江锐. LF 低频唤醒技术在 TPMS 中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2007(3): 155-157.
- [7] 杨平, 王威. MSP430 系列超低功耗单片机及应用[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(12): 48-50.
- [8] 金允霖, 赵春宇. 应用 Atmel 低频唤醒收发芯片降低功耗的设计[J]. 电子技术应用, 2007, 33(5): 55-57.
- [9] 邵军, 谭励, 王晓焱, 等. 汽车胎压监测系统的设计及其通信抗干扰研究[J]. 测控技术, 2014, 33(3): 11-14.
- [10] 李艳华, 肖文光. 采用低频配置的新型胎压监测系统的设计[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 52-58.
- [11] 何梓滨, 蒋方亮, 柏向春. 超低频信号测量中 ADC 系统的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(S1): 75-79.
- [12] 张春芳, 王家龙, 马玉清. 高集成度胎压监测发射系统设计与实现[J]. 电子产品世界, 2013, 20(12): 58-60.
- [13] 陈向阳. TPMS 的研究和实现[J]. 科技资讯, 2012(27): 20-21.
- [14] 赵林海, 邱宽民, 邓文坤. 基于虚拟仪器的机车信号接收信息参数检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(5): 95-100.

作者简介

赵新, 硕士研究生。主要研究方向为测试计量技术与仪器。

E-mail: zhaoxinmail@163.com