

文章编号 1004-924X(2012)08-1862-08

## 分布式电磁接收系统多频标定信号的产生与检测

张文秀, 林 君\*, 周逢道, 刘立超

- (1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026;
2. 吉林大学 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 为了提高分布式电磁接收系统频域标定的效率和精度, 提出了一种基于多频伪随机信号的标定方法并研究了多频标定信号的产生和标定数据的处理方法。首先, 根据多频伪随机信号的解析式分析了其主频点的振幅和分布特点, 通过现场可编程门阵列(FPGA)实现了伪随机信号的编码合成并产生了高精度双极性标定信号源。然后, 基于相关检测的噪声抑制原理, 给出了检测含噪声多频标定输出信号幅度和相位的多次相关迭代法并通过仿真进行了验证。最后, 对分布式双通道电磁接收系统的采集通道和磁场传感器进行了标定测试。结果表明: 在外界噪声不大于标定输出信号幅度的环境下, 检测结果幅度误差小于2%, 相位误差小于1°。该标定方法快速准确, 可用于分布式电磁接收系统在不同野外环境下的频域标定。

**关键词:** 电磁探测; 多频伪随机信号; 频域标定; 磁场传感器; 相关检测

**中图分类号:** TH762; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1862

## Generation and detection of multi-frequency calibration signal for distributed electromagnetic receiver

ZHANG Wen-xiu, LIN Jun\*, ZHOU Feng-dao, LIU Li-chao

- (1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
  2. Key Laboratory for Geo-exploration Instrumentation of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China)
- \* Corresponding author, E-mail: lin\_jun@jlu.edu.cn

**Abstract:** To improve the efficiency and accuracy of calibration in frequency domain for a distributed electromagnetic receiver, a calibration method based on multi-frequency pseudo-random signal was proposed and the generation and detection of the signals were investigated. According to the analytical expression of multi-frequency pseudo-random signals, the amplitude and distribution characteristics of the main frequency were analyzed, and a high-precision bipolar calibration source was produced through a Field Programming Gate Array(FPGA) to achieve the encoding synthesis of pseudo-random signals. Based on the noise suppression principle of correlation detection, an iterative method with multiple times for the amplitude and phase of a noisy multi-frequency calibration output signal was given, then it was validated by a simulation. Finally, the acquisition channels of the distributed dual-

收稿日期: 2012-03-28; 修订日期: 2012-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器专项资助项目(No. 40727002); 教育部产学研用合作创新项目(No. OSR-02-01)

channel electromagnetic receiving system and a magnetic field sensor were calibrated actually. The results indicate that the amplitude error and the phase error are less than 2% and 1°, respectively, while the outside noise is not greater than the calibration output signal. The calibration method is fast, accurate and can be used in the frequency-domain calibration of distributed electromagnetic receiving systems in various field environments.

**Key words:** electromagnetic detection; multi-frequency pseudo-random signal; frequency-domain calibration; magnetic field sensor; correlation detection

## 1 引言

地球物理中的电磁探测方法是根据电磁感应原理研究天然或人工场源在大地中激励的电磁场分布,并由观测的场值来获取地下介质的电性结构<sup>[1]</sup>。该方法被广泛应用于寻找矿产及地下水资源、油气田和煤藏探测、水文及工程勘察等领域<sup>[2]</sup>。分布式电磁探测将多台接收系统布设在一条乃至多条测线上同步观测,测量效率高,可实现二维或三维勘探,是电磁探测仪器的未来发展方向<sup>[3-4]</sup>。由于接收系统的野外测量结果是仪器(包括电磁场传感器)和大地对激励信号的响应总和,而仅有后者携带地下介质电性信息。只有从实际测量结果中消除仪器的响应,才能真实复原大地的电磁响应,从而获得精确的地下解释。因此,仪器标定是野外测量前的重要环节,标定精度直接影响测量结果的准确性。

根据电磁波的传播特性,当地下介质电阻率一定时,其穿透深度与频率的平方根成反比<sup>[5]</sup>。仪器按对数等间隔改变频率测量时,探测深度随之线性等距均匀变化。接收系统频域标定时,通常采用正弦波或方波作为标定信号。正弦波标定法逐次测量频带内各频点的幅度和相位响应,从而得到幅频和相频特性曲线<sup>[6]</sup>。缺点是单次只能标定一个频点,标定时间长,另外正弦波信号源需要由 D/A 产生,电路复杂。方波标定法利用其丰富的谐波成分,一次标定多个频点,提高了标定的效率<sup>[7]</sup>。但方波信号的基波和谐波在对数频率坐标上分布不均,随着谐波次数增加先疏后密,因此方波的标定频点与仪器测量频点难以吻合,实际测量频点的响应需要通过寻找附近标定结果替代或插值获得,对于非线性的频率响应误差较大。另外方波谐波幅度以  $1/n$  ( $n$  为谐波次数) 的规律衰减,能量分布不均,标定时可使用的谐波个数有限。

除了提高标定信号源和数据采集单元的性能外,标定数据处理也是影响标定精度的关键因素之一<sup>[8]</sup>。传感器在野外现场标定时,受环境影响落入系统观测频带内的噪声叠加到标定输出信号中,如果不加以抑制,势必产生较大的标定误差。相关检测技术是一种从噪声中提取信号的有效方法,它利用被测信号周期性和噪声随机性的特点,采用相关运算去除噪声实现信号的检测<sup>[9-12]</sup>。本文针对分布式电磁接收系统频域标定中正弦波法和方波法存在的不足,采用主频点对数等间隔分布,幅度近似相等的多频伪随机信号作为标定信号,通过多次互相关迭代算法实现了多频信号的检测,有效抑制了标定过程中环境噪声的影响,实现了各频率成分幅度和相位参数的精确提取,提高了标定的效率和精度。

## 2 分布式电磁接收系统标定原理

分布式电磁接收系统的标定包括数据采集通道标定和电磁场传感器标定,标定原理如图 1 所示。

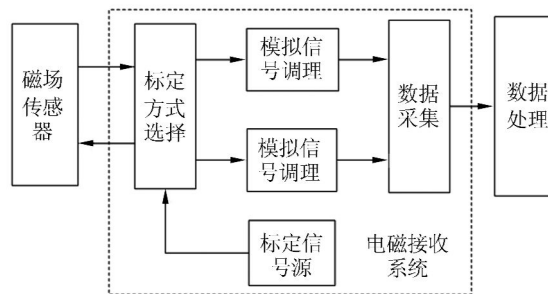


图 1 分布式电磁接收系统标定原理图

Fig. 1 Block diagram of distributed receiver calibration

### 2.1 数据采集通道标定

电磁场传感器输出的电压信号经过模拟调理电路后送入 A/D 进行数据采集,采集通道的一致

性是分布式电磁接收系统的关键指标之一。受元器件、电路参数、安装工艺等因素影响,不同接收系统之间,同一接收系统不同采集通道之间均存在差异。采集通道标定原理如图 1 所示,通过标定方式选择开关,标定信号源输出信号直接接入测量通道,经过模拟信号调理、数据采集及处理,得到各频率点输出信号的幅度和相位,采用相应输入标定信号进行归一化,得到采集通道幅度和相位标定曲线,用于对实测数据的校正。

## 2.2 电磁场传感器标定

分布式电磁接收系统采用金属导线连接与大地接触的电极测量电场。与接地电阻相比,电极内阻、电极引线的电阻和自感、引线与大地的分布电容较小,因此电场信号获取装置引起的幅度误差和相位偏移较小,通常可忽略。测量磁场时使用感应式磁场传感器,仪器实际记录的是传感器转换输出的电压信号,因此需要对磁场传感器进行标定以求得其灵敏度(电压与磁场强度比值)和相频特性曲线,用于将实测电压值转换为被测磁场强度。

进行磁场传感器标定时,采用通电螺旋线圈(标定线圈)产生标准磁场<sup>[13]</sup>。其管内中央部分磁场是均匀的,螺线管轴线中点磁场值为:

$$B = \mu_0 I \frac{N}{l} \frac{1}{\sqrt{1+4R^2/l^2}}, \quad (1)$$

其中: $I$ 为通过每匝线圈的电流, $N$ 为匝数, $l$ 和 $R$ 分别为螺线管长度和半径, $\mu_0$ 为真空磁导率。当标定线圈几何参数确定后,产生的磁场强度与线圈中通入的电流成正比,即在标定频带内(低于 10 kHz)与标定信号电压成正比。磁场传感器标定时,标定信号源的输出连接标定线圈产生已知的激励磁场,同时测量标定输入信号和磁场传感器输出信号,经过数据处理,获得各频率点的幅度和相位。由于结果中包含采集通道响应,利用数据采集通道标定曲线归一后再进行计算,可获得准确的磁场传感器灵敏度和相位标定曲线。

## 3 多频标定信号源的产生

### 3.1 多频伪随机信号特点

何继善院士提出了一种 $2^n$ 序列伪随机编码信号<sup>[13]</sup>,用 $p(2, n, t)$ 表示 $n$ 频波,在周期 $[0, T)$ 内,多频信号的解析式如下<sup>[14]</sup>:

$$p(2, n, t) = \begin{cases} A & 0 \leq t < \frac{l_1 T}{2^n} \\ -A & \frac{l_1 T}{2^n} \leq t < \frac{l_2 T}{2^n} \\ \dots & \dots \\ A & \frac{l_{m-2} T}{2^n} \leq t < \frac{l_{m-1} T}{2^n} \\ -A & \frac{l_{m-1} T}{2^n} \leq t < \frac{l_m T}{2^n} = T \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $A$ 为幅度, $m$ 为区间数, $l_k (k=1, 2, \dots, m)$ 为整数,伪随机 $n$ 频波每个区间振幅相同,长度为 $T/2^n$ 的整数倍。通过傅里叶级数展开将其表达为无数个频率成分之和的形式。

$$p(2, n, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2A}{k\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{M}{2}-1} \left[ (-1)^i \cos \left\{ \frac{l_i k}{2^{n-1}} \right\} + \cos(k\pi) \right] \right\} \sin k\omega_0 t.$$

当 $n$ 取不同值时各频率成分的傅里叶系数(即振幅)不同。分别取 $n=3, 5, 7$ ,计算各主要频率振幅,并根据帕斯瓦尔(Parseval)定理计算主要谐波成分能量之和在总能量中所占份额,如表 1 所示。

表 1 多频伪随机信号主频振幅及能量份额

	$n=3$	$n=5$	$n=7$
$k=1$	0.900 3	0.631 7	0.477 6
$k=2$	0.636 6	0.588 1	0.473 8
$k=4$	0.636 6	0.543 4	0.466 5
$k=8$	0	0.477 5	0.453 2
$k=16$	0	0.477 5	0.430 8
$k=32$	0	0	0.397 9
$k=64$	0	0	0.397 9
份额	0.810 5	0.748 1	0.688 9

$2^n$ 序列伪随机信号主要频率成分有 $n$ 个,相邻频率之比为 2,在对数坐标上具有均匀分布的特点。主要谐波成分振幅相差不大,相位相同,能量之和占了总能量的大部分。由于 $2^n$ 序列伪随机信号具有多频等幅对数等间隔分布的特点,与正弦波和方波相比是一种用于分布式电磁接收系统频域标定较为理想的信号。

### 3.2 多频伪随机编码合成

基于现场可编程门阵列(FPGA)采用 VHDL 语言设计了状态机程序实现多频伪随机的编码合

成。驱动状态机实现状态转换的激励时钟由任意频率分频器产生,时钟频率为待生成多频波最高频率的 2 倍,状态数由多频波所分区间个数确定。状态的改变发生在激励时钟的上升沿,通过位数为  $n$  的二进制计时器对激励时钟进行计数,根据计数值决定状态的等待或转移。以三频伪随机波为例,当基频为 1 Hz 时,要求激励时钟频率为 8 Hz,状态总数等于区间个数 4,二进制计数器位数等于主频个数 3。图 2 为三频伪随机编码合成过程的状态转移图。

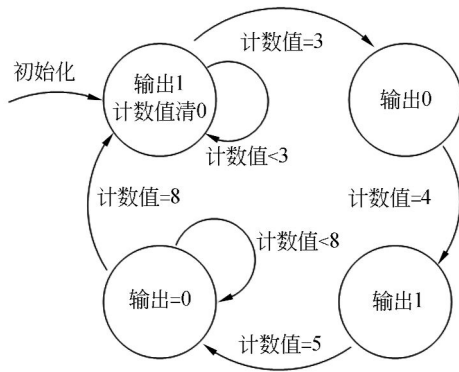


图 2 三频伪随机波合成状态图

Fig. 2 State diagram for triple-frequency pseudo-random waveform synthesis

### 3.3 双极性标定信号源产生

由 FPGA 合成的多频伪随机输出波形是 LVTTTL 电平的数字信号,幅度为 3.3 V 且含有直流分量。直接作为标定信号源其电压精度及单极性不能满足精确标定需求。图 3 为产生高精度双极性标定信号源的原理图。

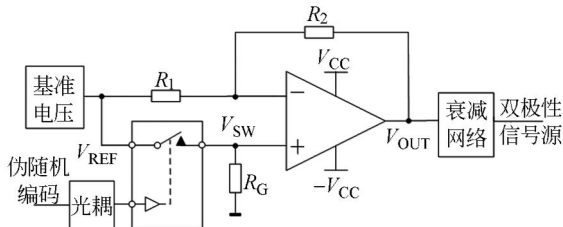


图 3 双极性标定信号源原理图

Fig. 3 Schematic of bipolar calibration source

将 FPGA 合成的多频伪随机编码信号经过光耦隔离作为模拟开关的控制信号,模拟开关输入端接精度为 0.01% 的基准电压源 REF3225,随着多频伪随机编码的高低电平变化,模拟开关通断产生单极性模拟电压信号,其幅度为基准电压

值,相位与多频伪随机信号相同。单极性模拟信号与基准电压同时送入减法器,输出为:

$$V_{OUT} = V_{SW} \times (1 + \frac{R_2}{R_1}) - V_{REF} \times (\frac{R_2}{R_1}) \quad (3)$$

当  $R_1 = R_2$  时,  $V_{OUT} = 2V_{SW} - V_{REF}$ ,实现了单极性到双极性的变换,再经过精密电阻构成的衰减网络,产生幅度可调的标定信号源。基于高精度基准电压源、模拟开关及减法器的标定信号源产生方法,避免了设计复杂的 D/A 电路,其精度保证了不同仪器标定信号源的一致性。

## 4 多频标定输出信号检测

### 4.1 相关检测的噪声抑制

设两路同频率的正弦信号分别叠加了噪声  $n(t)$  和  $v(t)$ ,表达式如下:

$$x(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi) + n(t) \quad (4)$$

$$y(t) = B\sin(\omega_0 t + \theta) + v(t) \quad (5)$$

由于噪声与信号互不相关,且两噪声为非同源随机噪声,则  $x(t)$  与  $y(t)$  的互相关函数为<sup>[15]</sup>:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(t - \tau)y(t) dt = \frac{AB}{2} \cos(\omega_0 \tau + \varphi - \theta) \quad (6)$$

从式(6)可知,互相关函数只含有 2 个同频信号的幅度和相位差,噪声得到抑制。

由于叠加了噪声的被测标定输出信号的频率已知,通过计算机产生同频率,幅度为 1,相位相差 90° 的两个参考信号  $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$ ,分别与被测信号  $x(t)$  进行互相关运算:

$$R_{r_1}(0) = \frac{A}{2} \cos \varphi \quad (7)$$

$$R_{r_2}(0) = \frac{A}{2} \sin \varphi \quad (8)$$

计算式(7)、式(8),得到被测信号的幅度和相位:

$$A = \sqrt{R_{r_1}^2(0) + R_{r_2}^2(0)} \quad (9)$$

$$\varphi = \text{atan}[R_{r_2}(0)/R_{r_1}(0)] \quad (10)$$

### 4.2 多频伪随机信号的迭代检测

上述相关检测原理是基于单一频率的正弦波的检测方法,由于多频伪随机信号含有基波和多次谐波,对其傅里叶级数展开式进行简化得到:

$$p(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k(\sin k\omega_0 t + \varphi_k) \quad (11)$$

式中： $k$  为谐波次数， $A_k$  为谐波幅值， $\varphi_k$  为谐波相位。用于与  $p(t)$  做互相关计算的参考信号  $r(t) = \sin k\omega_0 t$ ，它们的互相关函数为：

$$R_{pr}(\tau) = \frac{A_k}{2} \cos(k\omega_0 \tau + \varphi_k). \quad (12)$$

在互相关函数中只指示出了频率为  $k\omega_0$  的信号的幅度和相位，其它谐波分量的幅度和相位都丢失了。因此要检测多频伪随机信号的谐波成分，需要分别生成与谐波频率相同的多个参考信号，进行多次相关分析。相关法检测多频伪随机信号各主要频率成分的迭代流程如图 4 所示。

为了验证相关检测方法的噪声抑制能力及参数提取精度，采用 matlab 进行了仿真。被测信号为三频伪随机信号，幅度 1 V，基频 1 Hz，采样率 128 Hz，采样点数 32 768，在多频信号中依次加入不同幅度的高斯白噪声。表 2 为幅度和相位的检测结果，在噪声幅度不大于信号幅度的条件下，相关检测结果幅度误差小于 1.6%，相位误差小于 1°。

表 2 带噪声的多频伪随机信号检测结果

Tab. 2 Detection results of multi-frequency pseudo-random signals with noises

噪声幅度 /V	幅度检测结果/V						相位检测结果/(°)		
	$k=1$	误差/%	$k=2$	误差/%	$k=4$	误差/%	$k=1$	$k=2$	$k=4$
0	0.900 3	0.000 0	0.636 6	0.000 0	0.636 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
0.1	0.899 9	-0.033 9	0.635 8	-0.050 2	0.637 3	0.043 8	0.086 9	0.018 4	-0.069 0
0.3	0.904 9	0.411 2	0.627 7	-0.567 0	0.637 7	0.069 9	-0.111 4	-0.010 3	0.254 6
0.5	0.899 3	-0.091 7	0.633 5	-0.198 6	0.645 6	0.575 8	-0.158 2	-0.146 5	0.310 4
0.7	0.917 7	1.563 0	0.639 4	0.178 2	0.643 5	0.437 1	0.127 5	-0.616 8	-0.583 7
0.9	0.895 7	-0.413 1	0.639 6	0.190 7	0.639 3	0.172 6	0.838 9	0.270 5	-0.189 8
1.0	0.890 0	-0.928 6	0.627 2	-0.601 5	0.629 0	-0.486 0	-0.097 9	0.561 6	-0.990 7

## 5 标定测试结果

### 5.1 多频标定信号源测试

利用 Tektronix 数字示波器 TDS2012B 对多频标定信号源的输出波形进行了测试，如图 5 所示。图 5(a) 为基频 8 Hz 的五频伪随机信号时域波形，波形具有周期性，每个周期有 12 个间断点。利用示波器的快速傅里叶变换(FFT)计算功能对其进行了频谱分析，见图 5(b)，在基波 8 Hz 和主要谐波 16, 32, 64, 128 Hz 5 个频率点处幅度较大且近似相等，其它谐波幅度相对较小。

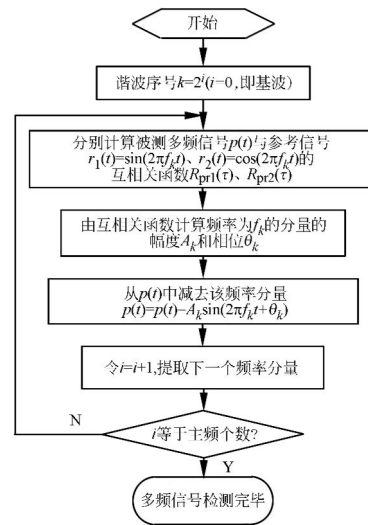
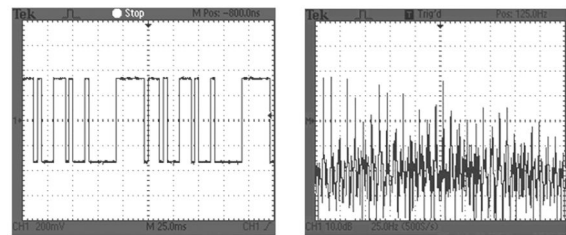


图 4 多频伪随机信号相关检测流程图

Fig. 4 Flowchart of correlation detection for multi-frequency pseudo-random signal



(a) 时域波形 (b) 频谱分析

(a) Time domain waveform (b) Spectrum analysis

图 5 五频伪随机标定信号

Fig. 5 Quintuple-frequency pseudo-random calibration signal

## 5.2 采集通道标定结果

采集通道标定时,多频伪随机输入信号幅度为 1.0 V,相位为  $0^\circ$ 。标定频率为 0.04~8 192 Hz,标定频点与仪器工作频点相同,总计 54 个,使用 9 个五频波和 3 个三频波实现。标定输出信号经采集后通过多次相关迭代检测各主频的幅度和相位,结果分别与输入信号的幅度和相位相除和相减,得到如图 6 所示的归一化采集通道标定曲线。由于标定信号在仪器内部直接输入测量通道,外界噪声干扰被屏蔽,标定输出信号中的噪声只为仪器的本底噪声,量值很小,相关迭代检测结果准确,标定曲线光滑,两个采集通道频率特性差异较小。

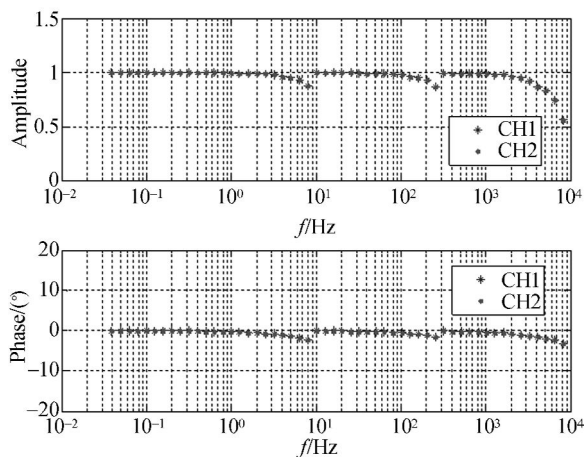


图 6 采集通道标定曲线

Fig. 6 Calibration curves of acquisition channels

由于仪器工作频带较宽,为了避免使用高采样率采集低频信号时产生过大的数据量,将测量频带分为高、中、低三段,根据采样定理,每段设定的采样率满足大于被测多频信号最高主频 2 倍的要求。由于同一频段采样率相同,随着被测信号频率的升高,信号单个周期的采样点数减少。同时受  $\Delta\Sigma$  模数转换器中数字抽取滤波器的低通频率响应影响,各频段的高频端幅度和相位误差增大。提高采样率可减小误差,但采样比增大势必导致数据量增加,降低系统工作时数据存储和传输的效率。

## 5.3 磁场传感器标定结果

使用经过采集通道标定的接收系统对磁场传感器 MFS06e 进行了标定。为了检验相关检测方法的噪声抑制能力及对多频信号的检测精度,首先将幅度为 250 mV 的多频标定信号接入标定线

圈,产生强度为 1 nT 的磁场,由于 MFS06e 灵敏度较高(大于 10 Hz 时约为 0.8 V/nT),因此传感器输出的感应电压较大,远大于外界噪声,标定结果准确,可将其作为此传感器灵敏度及相位的标准值。接下来在相同的外界噪声环境下,减小标定信号幅度至 2.5 mV,产生的磁场强度随之降低至 0.01 nT,对磁传感器重新进行标定,含噪声的标定输出信号分别采用相关检测方法和频谱分析直接提取方法处理,计算结果与标准值的对比如图 7 所示。

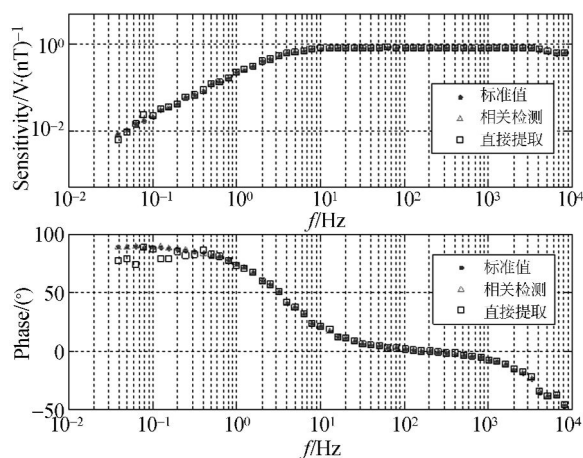


图 7 磁场传感器标定曲线

Fig. 7 Calibration curves of magnetic sensors

从图 7 可以看出,对于 1 Hz 以上频率两种方法结果与标准值误差均较小,但低于 1 Hz 直接提取结果误差较大,这是由于磁场传感器低频时灵敏度减小,传感器输出的感应电压幅度与外界噪声相当,不经过处理误差较大。而相关检测方法具有较强的噪声抑制能力,计算结果准确,与标准值相比所有频率点幅度误差小于 2%,相位小于  $1^\circ$ 。

## 6 结 论

分布式电磁接收系统频域标定是消除仪器自身误差,准确获取大地真实电磁响应的重要手段。本文针对正弦波和方波标定法存在的效率和精度问题,提出了一种基于多频伪随机信号的标定方法。介绍了采集通道和磁场传感器的标定原理,研究了多频标定信号的产生和标定数据的处理方法。基于 FPGA 实现了伪随机信号的编码合成并通过单双变换产生了高精度的双极性标定信号源,给出了含噪声多频标定输出信号幅度和相位

的多次相关迭代检测方法,并通过仿真进行验证。最后,对分布式双通道电磁接收系统的采集通道和磁场传感器进行了标定测试。结果表明:在外界噪声不大于标定输出信号幅度的测试环境下,

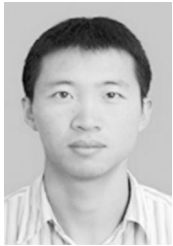
检测结果幅度误差小于 2%,相位误差小于 1°。该标定方法快速准确,增强了对噪声环境的适应能力,可用于分布式电磁接收系统在不同野外环境下的频域标定。

### 参考文献:

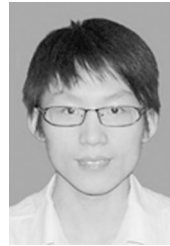
- [1] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社, 1990.  
PIAO H R. *Principle of Electromagnetic Sounding* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [2] MICHAEL S. Z. Electromagnetic geophysics: Notes from the past and the road ahead[J]. *Geophysics*, 2010, 75(5): 75A49-75A66.
- [3] 陆其鹤, 吴天彪, 林君. 地球物理仪器学科发展研究报告[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 750-758.  
LU Q H, WU T B, LIN J. A research report on development of instrument science for geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2): 750-758. (in Chinese)
- [4] KINGMAN J E, DONOHUE J G, RITCHIE T J. Distributed acquisition in electrical geophysical systems[C]. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Toronto, Canada; Milkereit B*, 2007: 425-432.
- [5] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source[J]. *Geophysics*, 1975, 40(1): 669-683.
- [6] 耿胜利, 赵庆安. 磁传感器标定技术与误差分析[J]. *地震地磁观测与研究*, 1988, 9(2): 50-55.  
GENG S L, ZHAO Q A. The magnetic sensor calibration and error analysis[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 1988, 9(2): 50-55. (in Chinese)
- [7] 王言章, 程德福, 万云霞, 等. 混场源电磁接收与标定系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(2): 304-308.  
WANG Y ZH, CHENG D F, WAN Y X, et al.. Design of hybrid-source magnetotelluric reception and calibration system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(2): 304-308. (in Chinese)
- [8] 周云耀, 蔡亚先. 甚宽频带地震计频域标定的相关处理技术[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(7): 632-635.  
ZHOU Y Y, CAI Y X. Correlation Processing Techniques in Frequency-domain Calibration for Very Broadband Seismometer [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(7): 632-635. (in Chinese)
- [9] 张建明. 探讨数字相关滤波在精密位置检测与控制系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(3): 38-45.  
ZHANG J M. Application of digital correlation filtering in precision positioning system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3): 38-45. (in Chinese)
- [10] 高爱华, 孙金荣, 秦文昱. 微弱激光信号的数字相关检测技术[J]. *西安工业大学学报*, 2010, 30(1): 5-8.  
GAO A H, SUN J R, QIN W G. Investigation of a digital correlation for slight laser signal detection [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2010, 30(1): 5-8. (in Chinese)
- [11] 王兰炜, 赵家骝, 王子影, 等. 相关检测在甚低频电磁信号检测中的应用[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(4): 339-346.  
WANG L W, ZHAO J L, WANG Z Y, et al.. Application of correlation detection to ELF signal detection [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2004, 26(4): 339-346. (in Chinese)
- [12] 周曲, 颜国正, 王文兴. 相关系数分析在模糊图像参数识别中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 988-995.  
ZHOU Q, YANG G ZH, WANG W X. Application of correlation analysis to parameter recognition for blur image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15

- (6):988-995. (in Chinese)
- [13] 邵英秋,王言章,程德福,等. 基于磁反馈的宽频带磁传感器的研制[J]. 仪器仪表学报,2010,31(11):2461-2466.  
SHAO Y Q, WANG Y ZH, CHEN D F, *et al.*. Development of broad frequency band magnetic field sensor based on flux feedback [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010,31(11):2461-2466. (in Chinese)
- [14] 何继善,佟铁钢,柳建新.  $a \sim n$  系列伪随机多频信号数学分析及实现[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(6):1666-1671.  
HE J SH, TONG T G, LIU J X. Mathematical analysis and realization of  $a \sim n$  sequence pseudo-random multi-frequencies signal [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009,40(6):1666-1671. (in Chinese)
- [15] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
GAO J ZH. *Detection of Weak Signals*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

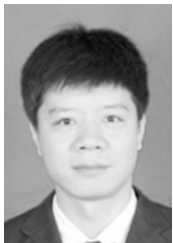
#### 作者简介:



张文秀(1985—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,2007年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事分布式电磁探测仪器方面的研究。E-mail: zwx07@mails.jlu.edu.cn



刘立超(1989—),男,湖北天门人,硕士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事电磁探测仪器方面的研究。E-mail: liulc11@mails.jlu.edu.cn



周逢道(1970—),男,安徽宣城人,博士,教授,1994年于长春地质学院获得学士学位,1999年于长春科技大学获得硕士学位,2010年于吉林大学获得博士学位。主要从事电磁探测技术与装备的研究。E-mail: zhoufd@jlu.edu.cn



#### 导师简介:

林君(1954—),男,吉林通化人,教授,博士生导师,1982、1987年于长春地质学院分别获得学士、硕士学位,主要从事地下信息探测技术与仪器、智能测试与控制、信号检测与处理等方面的研究。E-mail: lin\_jun@jlu.edu.cn