# 电磁法勘探中梯度场测量方法研究\*

刘长胜<sup>1,2</sup>,刘 鹏<sup>1,2</sup>,曾新森<sup>1,2</sup>,张景元<sup>2</sup>,史志辉<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学 地球信息探测仪器教育部重点实验室 长春 130061;2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130061)

**摘 要:**梯度测量对提高电磁法勘探的分辨能力和压制环境噪声干扰具有重要意义。通过硬件差分直接测量梯度场和先测量 绝对场后经软件差分计算求取梯度场是实现电磁梯度数据获取的两种典型方式。给出了这两种测量方式的具体实现方案,并 对测量效果进行了对比分析,探究了误差来源和压制方法。研究表明,测量通道的不一致性,尤其是相位差是影响电磁梯度测 量准确性的关键因素。对于硬件差分直接测量梯度场而言,这种通道不一致引起的误差难以通过事后校准的方法消除,且误差 大小随梯度值减小而急剧增加,最终不可用。先测量绝对场后进行软件差分的方法,可以得到更小的测量误差,而且通过通道 校准后,测量精度得到进一步提高。在不能确保采集通道高度一致的情况下,先测量绝对场再求取梯度场的方式是实现电磁梯 度测量的最优途径,该方法还可以同时获取绝对场以辅助梯度数据解释。该研究成果为电磁梯度系统开发提供了有益参考。 依据该方法所研制的频率域电磁场梯度采集系统在江苏滩涂获得的实验结果也证明了该测量方法的优越性。

关键词:电磁法;梯度测量;一致性;硬件差分;软件差分

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4010

# Study on gradient measurement in electromagnetic exploration

Liu Changsheng<sup>1,2</sup>, Liu Peng<sup>1,2</sup>, Zeng Xinsen<sup>1,2</sup>, Zhang Jingyuan<sup>2</sup>, Shi Zhihui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Geo-exploration Instrumentation of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Gradient measurement has a great significance to improve the resolution of electromagnetic exploration and to suppress the environmental noise and interference. There are two types of methods to measure gradient filed, measuring differential signal directly by hardware and calculating difference between two channels of absolute vector field. In this paper, the specific implementation of this two modes are achieved, and the results of this two methods are compared. Besides the sources of error and methods to suppress noise are explored. The research shows that discordance between channels, especially the phase difference is the key to influence measurement accuracy. As the hardware mode acquires differential signal by hardware directly, it is difficult to eliminate the error caused by discordance between channels according to calibration method. Moreover, the error magnitude increases with the decrease of the gradient too rapidly to measure the gradient field. The software mode, which acquires gradient field by software difference method after measuring absolute field, can achieve smaller error, and the measurement accuracy can be further improved after the channel calibration. In one word, if it's difficult to ensure the highly discordance between channels, the software mode is the optimal way to realize the measurement of electromagnetic gradient, which can obtain the absolute field simultaneously to aid gradient data interpretation. The results of this study provide a useful reference for the development of electromagnetic gradient system. According to the method, array receivers are designed for frequency-domain controlled-source electromagnetic gradient method, and the experimental results in Jiangsu verifies the superiority of the measurement method.

Keywords: electromagnetic method; gradient measurements; consistency; hardware difference; software difference

收稿日期:2016-10 Received Date: 2016-10

<sup>\*</sup>基金项目:吉林省重点科技攻关项目(20150204021G X)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030133)资助

## 1 引 言

目前可控源电磁法已经被广泛应用于地下结构探测,可以对大地电性特征进行成像,从而揭示矿体、断裂带、含水构造等电性异常体,为识别矿藏和地质灾害源提供依据。可控源电磁法当前普遍测量的是电场和磁场的绝对场值,通过测量天然场源或人工场源激发下大地的电磁响应,反演计算大地的电阻率参数。可控源电磁法仪器常用的有加拿大 V8 系统、美国 GDP-32 III系统和德国 TITAN 系列等,均是直接测量电磁场的绝对值,占据了我国的绝对市场。国内中南大学、廊坊物化探所、吉林大学、中科院地质与地球物理所等高校和科研单位也研制了同类系统,包括可控源音频电磁法和广域电磁法系统等,测量的都是绝对场,目前正在推广应用<sup>[13]</sup>。

然而,绝对场测量在背景干扰抑制能力和电性边界 分辨能力方面,存在先天不足,难以实现大地电性结构的 精细探测<sup>[4]</sup>。课题组对电磁梯度测量进行了理论研究和 仿真分析,表明其在背景干扰压制和电性异常体边界分 辨上具有较好的性能表现。但是在电磁梯度测量方面, 国内相关研究较少。相比较而言,国外的磁法勘探和重 力勘探则早在 20 世纪中期便实现了梯度测量。相对重、 磁绝对测量,重磁梯度测量显示出了对背景干扰的良好 抑制能力和对异常体边界形态出色的分辨能力<sup>[56]</sup> 然 而,重磁梯度仪器属于高精尖技术,国外对我国限制 出口。

在重力和磁法测量中,普遍采用两种方法测量梯度。 1)通过硬件电路(高精度梯度传感器)直接测得梯度 场<sup>[7-8]</sup>;2)利用两台单通道绝对场测量仪的数据差或同一 台绝对场测量仪器在不同测点的数据差,计算梯度<sup>[9-11]</sup>。 重磁梯度测量对电磁梯度有一定的参考意义。本文针对 这两种方法,分析测量误差对电磁梯度测试结果的影响, 选择合适的误差标定方法,确定适用于电磁梯度测量的 方式;并且以此方法为基础,课题组研制了频率域电磁场 梯度测量系统,并在江苏滩涂环境获得了有效的实验 数据。

# 2 基于梯度场的电磁法勘探方法

可控源电磁法通过在测区各个测点上记录一定频率 范围内的电、磁场值,实现对大地电阻率参数的测量,揭 示测区内地下介质电性结构特征。其中可控源音频电磁 法(controlled source audio frequency magnetotelluric, CSAMT),主要记录正交的电场分量  $E_x$  和磁场分量  $H_y$ , 然后依据式(1)和(2)计算出各频率对应的卡尼亚视电 阻率和阻抗相位<sup>[4]</sup>。频率范围一般在 0.1 Hz ~ 10 kHz, 不同频率对应地下不同深度信息。

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \tag{1}$$

$$\varphi_z = \varphi_{E_z} - \varphi_{H_y} \tag{2}$$

式中: $\varphi_{E_x}\varphi_{H_y}$ 分别表示  $E_x \setminus H_y$  的相位,  $\mu$  为介质磁导率,  $\omega$  为角频率。

电场通过测量两个相邻测点不极化电极的电位差 来获取,而磁场测量则需利用感应式磁棒测量。图1 所示为测量布置方式示意图,图中 L<sub>n</sub> 为测线,D<sub>n</sub> 为测 点。由于电场是通过两个相邻电极间的电位差获得, 所测电场位置记为两个测点的中点。绝对场测量时, 可以逐个完成各测点的电磁场数据采集,也可利用多 通道采集系统或多台接收机同时完成多个测点的数据 采集。无论何种方式,数据处理解释时,均是利用绝对 场数据。





绝对场测量方式尽管也是利用不同测点的电磁场 差异来反映大地电性结构的空间变化,但该方法没有 突出局部电性变化,也未能对相邻测点的一致性背景 噪声形成压制。本文基于梯度场的电磁测量方法则要 求测量相邻测点间的电场梯度数据,目的在于突出大 地电性的局部变化和压制背景噪声,提高勘探分辨能 力。梯度场的测量原理如图 2 所示,测线上所有相邻 测点之间的梯度场可以通过分布式多通道阵列接收系 统滚动采集获取。



第38卷

两相邻接收电极的电位经过差分后得到其中点的电场量  $E_x$ ,称作一次差分,是电势差分。对相邻电场量  $E_x$ 再次做差分运算,得到电场梯度值  $\Delta E_x$ ,称作二次差分, 是电场差分。设 s(t)为时域目标信号,n(t)为时域噪声,那么有:

$$e_{x1}(t) = s_1(t) + n_1(t)$$
(3)

$$\Delta e_{x12}(t) = [s_1(t) - s_2(t)] + [n_1(t) - n_2(t)]$$
(4)  

$$\Delta e_{x12}(t) = [s_1(t) - s_2(t)] + [n_1(t) - n_2(t)]$$
(5)

式中: $s_1(t) - s_2(t)$ 为目标信号的梯度值, $n_1(t) - n_2(t)$ 为噪声的差分量。由于相邻通道空间距离较近,且数据 采集是同步进行的,噪声 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 含有高度相关的 噪声成分,差分后该部分噪声将得到较好压制。电场梯 度值由相邻测点的地下电性差异引起,当大地电性结构 不变时,除了观测装置几何不对称可引起背景梯度外,与 大地相关的电场梯度值将为0。

采用长×宽×高为900 m×900 m×300 m 且电阻 率为10  $\Omega$ ・m的低阻异常体埋深于原点位置下方 300 m处的模型进行梯度场和绝对场的正演计算,其中 异常体周围介质电阻率为100  $\Omega$ ・m,异常体边界 x 坐 标为 – 450・m和450・m。图3所示为梯度测量方式 对 x 方向分辨率的改善效果图。图3(a)所示为电场 $E_x$ 绝对场在 x 坐标位置上幅度变化规律,包括均匀大地模 型和异常体模型,图3(b)所示为电场 $E_x$ 沿x 方向的梯 度场在 x 坐标位置上幅度的变化规律。梯度场在 – 450 m和450 m的位置上具有明显的极值,而绝对场 在 – 450 m和450 m 处没有特殊反应,在 – 600 m和 600 m 附近的位置有极值。由图3可知,梯度场能够更 好地反应异常体的边界。梯度能够反映电磁场信号的 变化量,具有比绝对场本身更高的分辨能力,具有进一 步研究的意义。







## 3 差分实现方案

梯度场信号可以通过对绝对场信号进行差分来得 到,可以采用以下两种差分方式。

#### 3.1 硬件电路差分

可控源电磁法的接收系统,一般由前置放大电路、滤 波电路、程控放大电路、AD转换电路和数字控制、存储、 显示模块等组成。为了获取电场梯度值,一种方案是参 考磁梯度测量的第一种方法,直接采用硬件差分电路实 现二次差分,如图4所示。





接收系统至少包含有两个通道,结构完全相同。电 场信号先经过前置同相比例放大器,然后经过滤波电路 (包括陷波器和低通滤波器)和程控放大器。与传统的 绝对场测量电路不同的是,在接收系统中增加差分放大 器。为了使仪器既可用于梯度场测量,又可用于绝对场 测量,这里采用了继电器切换。当继电器切换到 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、 D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub> 时,直接测得电场梯度值。 经过二次差分后,信号一般比较微弱,差分放大器 B<sub>0</sub>的性能好坏对梯度测量精度就有很大影响。为此,B<sub>0</sub> 要选用高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声、低漂移的差 分放大器。本文实验测试选用了 ADI 公司生产的仪表放 大器 AD8429 作为差分放大器件,同时为了使差分放大 器不受前级的干扰,有效"隔离"前后级之间的影响,在 AD8429 之前加入了电压跟随器,使信号不会损失在前级 电路的输出电阻中,工作原理如图 5 所示。



图 5 电场差分电路 Fig. 5 The electric-field differential circuit

#### 3.2 软件差分

软件差分即在硬件采集电路对绝对场信号进行 AD 转换之后,利用软件程序对所取得的绝对场数字信号做 差分运算。这种方案无需在接收系统中加入二级差分电 路,使得电路结构变得简单。相对硬件差分法不能同时 获得绝对场和梯度场而言,软件差分既可获得绝对场数 据,又可获得梯度场数据,具有一定优越性。但在数据采 集过程中,软件差分法不能在信号放大之前进行背景噪 声压制,这将在一定程度上限制信号放大倍数。

软件差分可以在时间域或频率域进行,考虑到频率 域更有利于信号的标定,本文先对绝对场数据进行目标 频谱提取,然后进行差分计算。设相邻测点绝对场信号 分别为  $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ ,则梯度场可利用式(6)~(8)编程 计算得到。

$$E_{1}(\omega) = \sum_{n=0}^{N} e_{1}(n) e^{-j\omega n}$$
(6)

$$E_2(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} e_2(n) e^{-j\omega n}$$
(7)

$$\Delta E_{12}(\omega) = E_1(\omega) - E_2(\omega)$$
(8)

## 4 测量误差分析

#### 4.1 硬件差分误差

利用硬件差分电路获取电磁场梯度信息时,测量的 精度主要由硬件系统的性能决定。一是采集通道对弱信 号的获取能力,即压制外部电磁干扰和内部电磁噪声以 取得较高信噪比的能力;二是二级差分获取梯度值前两 个采集通道的一致性,若出现两通道延时差异或放大倍 数差异,则将引入背景梯度,干扰梯度场的准确测量。但 受不极化电极以及电路元器件不一致性的影响,在实际 电磁法测量中难以保证测量通道的完全一致。



图 6 信号相位差示意图 Fig. 6 Signal phase schematic

设输入端两路信号为相位相同、频率均为 $\omega$ 、幅值分 别为a和b的正弦信号,如图6所示,两通道延时不一致 导致的相位差为 $\theta$ ,则过二级差分前两路信号分别为  $x_1(t), x_2(t)$ 。差分后得到的梯度值为:

$$\Delta x = a \sin(\omega t) - b \sin(\omega t + \theta)$$

$$\Re \| \exists_{1}(10) :$$
(9)

$$sin(x + y) = sinxsiny + cosxcosy$$
 (10)  
可得.

$$a\sin x + b\cos x = \sqrt{a^2 + b^2}\sin(x + \varphi)$$
(12)

$$\varphi = \arctan \frac{b}{a} \tag{13}$$

可得到:

$$\Delta x = \sqrt{a^2 - 2ab\cos\theta + b^2}\sin\left(\omega t + \arctan\frac{b}{a}\right) \quad (14)$$

原本梯度为  $| \Delta x | = a - b$  的电磁信号,经过硬件差 分得到的梯度值为:

$$\left|\Delta x\right| = \sqrt{a^2 - 2ab\cos\theta + b^2} \tag{15}$$

差分后梯度幅值与两路输入信号的幅度、及通道延时导致的相位差 $\theta$ 有关。在MATLAB中对不同的a-b和值进行仿真计算,其中b取10,得到梯度测量误差随实际梯度值和通道相位差的变化特征,如图7所示。





图7 中纵坐标为式(15)计算的测量值与实际输入值 |*a*-*b*|的相对误差。随着通道间相位差的增大,梯度测 量的相对误差越来越大;随着实际输入的梯度值(*a*-*b*) 的减小,梯度测量的相对误差也越来越大,而且增幅非常 显著。例如当实际输入梯度为0.4,*θ*=2°时,测量误差为 33.86%,当实际输入梯度为0.2,*θ*=2°时,测量误差为 102.7%。可见当梯度值较小时,采集通道的延时差异对 梯度测量结果的影响很大。

一般而言,信号频率越高,周期越小,通道延时差异 引起的相位差就越大。因此,采集通道延时不一致,对高 频电磁信号梯度测量的影响更为突出。若不能保证通道 的精确一致性,硬件差分法测量的的电磁梯度数据可能 不可用。

#### 4.2 软件差分误差

与硬件差分只能得到相邻通道差分后的电磁场梯度 值不同,软件差分法首先用硬件采集系统测出各通道的 输入信号,然后计算差值得到梯度场。这种方式允许通 过仪器通道标定技术,对作差前的各通道测量信号进行 校准,从而最大限度消除通道不一致性带来的误差。软 件差分的问题是,输入信号可能耦合有较强的外界电磁 噪声,要求仪器能够同时准确采集弱信号和强噪声。因 此仪器系统需要有大的动态范围、低的内部噪声。而硬 件差分,在二级差分时相邻通道的相关噪声得到大幅度 压制,后级电路可采用较大的放大倍数,减小系统内部噪 声影响。对于电磁法而言,外界电磁噪声大,系统内部噪 声一般可忽略。因此,关键是解决通道一致性对梯度测 量的影响。

## 4.3 通道校准与误差抑制

文献[12-14]分析了测量通道间群延时不同导致信 号经过测量系统后出现的失真和误差,并用移相器和分 数时延滤波器进行相位校正。吉林大学张文秀等人<sup>[15]</sup> 和刘立超等人<sup>[16]</sup>研究了伪随机信号标定方法并设计了 标定电路,得到了分布式电磁法仪器各个通道的幅值系数 和相位。这里主要讨论采集通道不一致性对梯度测量精 度的影响方式,以确定合适梯度测量的采集和标定方法。

野外测量时,传感器获取大地电磁响应信息,并传至 接收机输入端。接收系统获得的测量数据包含了两个部 分:1)大地的电磁响应及外界电磁噪声,包含有地下电性 结构信息;2)接收系统自身的响应,不含地下电性结构信 息。通道不一致性正是由接收系统自身响应引起。只有 去掉接收系统自身的响应,才能准确获得大地真实的响 应信号。

图8所示为各通道简化后的输入输出系统模型,

 $x_n(t)$ 为输入信号, $h_n(t)$ 为通道响应, $y_n(t)$ 为接收到的信号,n表示通道编号。根据线性时不变系统的性质,有如下卷积关系式:

$$y_{n}(t) = h_{n}(t) * x_{n}(t)$$
(16)  
相邻两通道的梯度值为:  
$$\Delta y_{n,n-1}(t) = h_{n}(t) * x_{n}(t) - h_{n-1}(t) * x_{n-1}(t)$$
(17)  
信用型本格 后组 网络医特尔里弗

博里町変換応特到的殃或這未为:  

$$\Delta Y_{n,n-1}(\omega) = H_n(\omega) * X_n(\omega) - H_{n-1}(\omega) * X_{n-1}(\omega)$$
(18)



$x_1(t) \longrightarrow$	CH 1	$h_1(t)$	$\rightarrow y_1(t)$
$x_2(t) \longrightarrow$	CH 2	$h_2(t)$	$\rightarrow y_2(t)$
÷	:	:	
$x_n(t) \longrightarrow$	CH n	$h_n(t)$	$\rightarrow y_n(t)$



对于软件差分方法,可以利用文献[15-16]提出的方法,由输入的伪随机信号和仪器测量结果得到 H(ω)(包括幅值以及相位偏差),并进行校正。但对于硬件差分方法,由于不能直接由系统本身获得二次差分前的数据,无法求出该部分电路的系统响应。即使借助其它测试工具在实验室对该部分电路进行标定,也不可避免野外工作环境导致的系统状态差异。此外,标定得到的是硬件二级差分前这部分电路的系统响应,无法用于后期的差分信号校准。

# 5 对比测试分析

#### 5.1 两种差分方式误差对比测试

为了确定合适的差分方式,对两种方式进行误差对 比测试。首先对比分析了幅度、相位和频率完全相同的 输入信号时硬件差分与软件差分的误差情况。测试采用 图 2 的硬件系统结构,当继电器切换到  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  时 获得是输入信号经过通道 1 和 2 后的结果(绝对场)。当 继电器切换到  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 时,通道 1 和 2 的信号还经 过了差分放大器  $B_0$ ,获得是硬件差分结果(梯度场)。在 保证信号不饱和的情况下,测试采用的输入信号为 200 mV。测试结果如表 1 所示,表 1 中数据均为硬件系 统采集数据经傅里叶变换所得的幅度和相位。

			1	· · · ·	<b>I</b>		
频率/Hz	CH1		CH2	2	硬件差分		
	幅值(×100 mV)	相位/(°)	幅值(×100 mV)	相位/(°)	幅值(×100 mV)	相位/(°)	-
10	1.978 0	-23.812	1.987 0	-23.886	0.004 2	-11.465	
20	2.009 0	145.995	2.017 0	145.991	0.004 3	171.640	
40	1.602 0	-94.414	1.603 0	-94.296	0.004 2	-51.287	
100	1.987 0	- 170.62	1.985 0	- 170. 398	0.009 9	- 105.310	
200	2.029 0	-22.311	2.037 0	-21.835	0.018 9	54.752	
400	2.036 0	82.632	2.045 0	83.593	0.037 1	164.602	
1 000	2.036 0	82.688	2.052 0	85.165	0.092 4	165.139	
2 000	2.027 0	-4.713	2.063 0	-0.015	0.1827	73.610	
4 000	1.987 0	-9.339	2.103 0	-0.629	0.346 4	59.004	

表 1 输入信号幅度、相位相同时系统测试结果 Table 1 Test results for input signals with same amplitude and phase

从通道1和2的数据来看测得的幅度值都有一定的 误差,其中40Hz由于靠近50Hz陷波器的中心频率,信 号有较大的衰减,所测得的值与输入信号相差较大,其他 频率幅度相对误差在4%左右,两通道输出信号的相位 相比于输入信号均出现了偏差,即通道对信号产生了的 延迟。不同频率信号延迟不同,同一频率信号经过两通 道后的相位也有差异。因此,通过系统硬件差分得到的 梯度值将存在明显误差,且该误差与频率有关。

用表1中通道1和2幅值作为α和b,相位差值作 为两通道延时不一致性引起的相位差异θ,根据式 (15),可估算出系统输出的梯度值。计算结果与硬件 差分的实测结果高度吻合,如图9所示。硬件差分的 梯度误差明显大于两通道所测绝对场的幅值之差,说 明两个差分通道间的相位偏差是导致信号差分后出现 误差的主要原因。



Fig. 9 Test results of differential modes

相位偏差产生的主要原因是电路中电抗性原件的存

在,如电感、电容等。引起通道不一致性的原因有很多, 主要有元器件的差异,电路板差分信号通路没有完全对称。不同频率下产生的相位失真也不同,可由如下公式 计算:

 $\theta$  = 360° ×  $\Delta t$  × f (19) 式中:信号频率为f,通过电路产生的延迟为  $\Delta t$ ,  $\theta$  即为 相位失真。当频率较大时,小的延迟也会产生较大的失 真。如表1 中数据所示,当频率增大时两通道信号的相 位差也越大,说明信号频率越高对测量电路的延时一致 性要求也越高。

根据软件差分原理,对测试数据用软件差分的方式 求得梯度值随频率变化曲线,如图9中曲线所示。由于 输入信号是相位、幅度相同的正弦信号,所以差分后的梯 度值理论上应该为0,由于有测量误差的存在,测量结果 不为0。对比软件差分和硬件差分的结果可知,软件差 分的梯度误差明显小于硬件差分,其梯度值更加接近真 实情况。同时,在做软件差分时,测量通道不一致性可以 进行校正,此时测量精度主要取决于测量通道对输入信 号的检测能力。所以,在电磁梯度测量过程中,软件差分 就比硬件差分更有优势。

由以上数据可知当频率为4000 Hz 时测量通道相位 差较大。为了进一步分析两通道相位差对梯度信号测量 的影响,将输入信号频率设为4000 Hz,且相位相同,但 两通道输入信号的幅度不同。各通道测试结果及软硬件 差分结果如表2所示。

由表2可知,当输入信号幅度不同相位相同时,由硬 件差分和软件差分后的结果(通道校准前)比较可知,软 件差分的结果更接近真实梯度值,相对误差较小。 输入频率相同,幅度不同测试结果

表 2

Table 2         Test results for input signals with the same frequency and different amplitude								
	输入值/mV		硬件测量值/mV		软件差分/mV		相对误差/%	
CH1	CH2	CH1 – CH2	CH1	CH2	CH1 – CH2	CH1 – CH2	硬件差分	软件差分
45.000	30.000	15.000	44.685	29.240	15.640	15.445	4.266	2.963
36.000	24.000	12.000	35.923	23.513	12.568	12.410	4.730	3.415
30.000	20.000	10.000	29.857	19.558	10.439	10.300	4.386	2.995
21.000	14.000	7.000	21.085	13.803	7.375	7.282	5.355	4.022
18.000	12.000	6.000	18.063	11.832	6.315	6.231	5.253	3.846
6.000	4.000	2.000	6.190	4.055	2.164	2.135	8.203	6.755
1.998	0.400	1.598	2.044	0.391	1.725	1.653	7.932	3.447
0.599	0.120	0.479	0.621	0.121	0.511	0.500	6.570	4.285

#### 5.2 软件差分校准后对比分析

根据本文校准原理,针对软件差分方式,对每个通道 的信号进行校准处理。向系统输入幅值为1 mV、频率为 4 000 Hz 的标准信号,通过多次测量各通道输出信号并 求取平均值,作为各通道的校准系数,测试结果如表3所示。利用该校准系数,对表2中各测量通道输出信号经通道校准后,再次计算软件差分结果,得到梯度值。如图 10所示,与之前的测试结果相比,此时梯度相对误差更小,更加逼近真实值。

表 3 通道校准数据 Talbe 3 Channel calibration data

次数	1	2	3	4	5	6	均值
CH1	0.9929963	0.997 849	0.995 238	1.004 032	1.003 498	1.031 601	1.004 202
CH2	0.974 677 8	0.979 697	0.977 882	0.985 938	0.986 017	1.013 625	0.986 306







图 11 电磁梯度采集系统野外测试 Fig. 11 Field test of electromagnetic gradient system

#### 6 野外测试

依据本文理论研制了频率域可控源电磁法梯度采集 系统,可同时采集多通道绝对场和梯度场数据。2016 年 12 月,在江苏省南通市如东县滩涂,本课题组利用新研 发的梯度采集系统进行了频率域电磁场梯度测试,现场 如图 11 所示。发射接收基频 64 Hz 的三频伪随机电磁 场信号(64、128、256 Hz)为例,测量极距 30 m。

图 12 所示为用梯度采集系统得到的绝对场和梯度 场数据对比图。由图 12 可知,频带内噪声水平显著降 低,梯度采集方法有效压制了通道间的相关噪声。

为了对比梯度采集系统和传统绝对场测量系统在获 取梯度信息能力上的差异,此次实验还采用绝对场采集 系统(JLEM2)分别采集了这两个测点的绝对场信号,再 做差分得到梯度信号。图 13 所示为梯度采集系统和绝 对场采集系统得到的电场梯度对比。绝对场采集系统得 到的梯度场中存在更大的不相关噪声,尤其是在信号频 率 128 Hz 附近,说明梯度场采集系统能更好地压制背景 噪声,更加灵敏准确地反映大地横向电性变化。



图 12 梯度场噪声压制效果

Fig. 12 Noise suppression effect of gradient measurement



图 13 梯度场采集系统与绝对场采集系统得到的梯度信号对比

Fig. 13 Gradient signals obtained respectively by the new gradient-field receiver and by an absolute-field receiver

# 7 结 论

进行电场梯度测量时,所采用的测量方式对于梯度 值的获取精度有重要影响。本文分析了两种典型的梯度 测量方式,指出了两种方式的原理及误差来源,并进行了 仿真计算和实际测试。结果表明,在用硬件差分获取梯 度值时,两个测量通道的不一致性将导致信号经过通道 后出现额外的相位差,而该相位差对差分后的梯度值有 直接的影响。随着相位差的增大,测量结果的误差也越 来越大,当输入信号梯度值较小的时,该相位差将导致测 量结果完全失真。而且通道校准技术在硬件差分的测量 方式中也难以应用。若采用先测量两相邻通道绝对场然 后通过软件差分计算梯度场的方式,则可以降低两通道 相位不一致性对梯度场的影响。进一步利用测量通道校 准技术,可以提高软件差分方法的梯度测量精度。理论 和实验结果表明,对电磁法梯度测量而言,软件差分的方 法更加方便有效。本文研究结果为电磁梯度测量系统的 开发提供了有益借鉴。

#### 参考文献

[1] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(3):1065-1072.

HE J SH. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 632-637.

- [2] 汤井田,任政勇,周聪,等. 浅部频率域电磁勘探方法 综述[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2681-2705. TANG J T, REN ZH Y, ZHOU C, et al. Frequencydomain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2681-2705.
- [3] 底青云,方广有,张一鸣.地面电磁探测系统(SEP) 研究[J].地球物理学报,2013,56(11):3629-3639.
  DIQY, FANGGY, ZHANGYM. Research of the surface electromagnetic prospecting (SEP) system [J].
  Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (11): 3629-3639.
- [4] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业 大学出版社,1991.
   HE J SH. Controlled source audio-frequency magnetotelluric method [M]. Changsha: Central South University Press, 1991.
- [5] NABIGHIAN M N, GRAUCH V J S, HANSEN R O, et al. 75th Anniversary: The historical development of the magnetic method in exploration [J]. Geophysics, 2005, 70(6): 33ND-61ND.
- [6] NABIGHIAN M N, ANDER M E, GRAUCH V J S, et al. 75th Anniversary: Historical development of the gravity method in exploration [J]. Geophysics, 2005, 70(70): 63ND-89ND.
- [7] 边少锋,纪兵.重力梯度仪的发展及其应用[J].地 球物理学进展,2006,21(2):660-664.

BIAN SH F, JI B. The development and application of the gravity gradiometer [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 660-664.

[8] 申茂冬,程德福,安战峰,等. 五棱台式全张量磁梯度 探头侧面倾角优化方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016,46(5):1732-1738.

> SHEN M D, CHENG D F, AN ZH F, et al. Optimization of slanting surfaces of five-sided pyramidal full tensor magnetic gradient probe [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(5): 1732-1738.

 [9] 赵珞成,罗志才,刘浩,等.重力梯度同步观测方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2012,37(4): 54-57.

ZHAO L CH, LUO ZH C, LIU H, et al. Simultaneous observation method of gravity gradient [J]. Journal of Jilin University: Geomatics and Information Science, 2012, 37(4): 54-57.

[10] 葛健, 陆承达, 董浩斌,等. 基于 Overhauser 传感器的 近地表 UXO 磁梯度法探测技术[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 961-974.

> GE J, LU CH D, DONG H B, et al. The detection technology of near-surface UXO based on magnetic gradient method and Overhauser sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):961-974.

 [11] 刘欢,董浩斌,葛健,等. 基于 Overhauser 效应的磁场 梯度探测器[J]. 仪器仪表学报,2015,36(3): 592-600.

LIU H, DONG H B, GE J, et al. Magnetic field gradient detector based on the nuclear Overhauser effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 592-600.

- [12] WEN Z, ZHENG P, LUO M, et al. Calibration method of amplitude and phase consistency of W-band transceiver components [C]. Asia-pacific Conference on Antennas and Propagation, 2014:902-905.
- [13] 何志华,何峰,黄海风,等.干涉 SAR 模拟器通道幅相特性实时校正方法[J].电子学报,2013(9): 1710-1715.

HE ZH H, HE F, HUANG H F, et al. Channel characteristic real-time correction of InSAR signal simulator [J]. Acta Electronica Sinica, 2013(9):

1710-1715.

- [14] 陈文俊,王建,聂在平.数字阵列天线接收通道宽带 信号校准与波束形成技术研究[J].电子学报,2013, 41(3):582-586.
  CHEN W J, WANG J, NIE Z P. Study on the calibration of receiving channels and the beamforming technology for wideband digital array antennas [J]. Acta Electronica
  - Sinica, 2013, 41(3):582-586.
    [15] 张文秀,林君,周逢道,等. 分布式电磁接收系统多频标定信号的产生与检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1862-1869.
    ZHANG W X, LIN J, ZHOU F D, et al. Generation and detection of multi-frequency calibration signal for distributed electromagnetic receiver [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8), 1862-1869.
  - [16] 刘立超,丁凯来,林君,等. 基于伪随机系统辨识的 电磁法仪器标定[J]. 仪器仪表学报, 2014,35(8): 1721-1728.
     LIU L CH, DING K L, LIN J, et al. Instrument

calibration with electromagnetic method based on pseudorandom system identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(8): 1721-1728.

#### 作者简介



**刘长胜**(通讯作者),2003 年于中南大 学获得学士学位,2009 年于吉林大学获得博 士学位,现为吉林大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁探测方法及仪器。 E-mail:liuchangsheng@jlu.edu.cn

**Liu Changsheng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2003 from Central South University and Ph. D. degree in 2009 from Jilin University. Now he is an associate professor in Jilin University. His main research interest include electromagnetic detection method and instrument.



**刘鹏**,2015年于吉林大学获得学士学位,现为吉林大学硕士研究生,主要研究方向为电磁法探测仪器。

E-mail:sz42685130@163.com

Liu Peng received his B. Sc. degree in 2015 from Jilin University. Now he is a

graduate student in Jilin University. His main research interest includes electromagnetic detection instrument.