2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2295-2308
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

淳少恒,许超,陈儒军,等.2026.浅层高分辨多发多收瞬变电磁(MIMO-TEM)接收系统研制.地球物理学进展,41(5):2295-2308,doi:10.6038/pg2026JJ0309.

CHUN ShaoHeng, XU Chao, CHEN RuJun, *et al*. 2026. Development of a high-resolution multi-input multi-output transient electromagnetic (MIMO-TEM) receiving system for near-surface application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2295-2308,doi:10.6038/pg2026JJ0309.

浅层高分辨多发多收瞬变电磁(MIMO-TEM)接收系统研制

Development of a high-resolution multi-input multi-output transient electromagnetic (MIMO-TEM) receiving system for near-surface application

淳少恒[1,6],许超[2,3,6],陈儒军[2,3,6*],谭文波[4,5],于凯[2,3,6],韦紫坤[2,3,6]

CHUN ShaoHeng[1,6], XU Chao[2,3,6], CHEN RuJun[2,3,6*], TAN WenBo[4,5], YU Kai[2,3,6], WEI ZiKun[2,3,6]

1. 无锡职业技术大学集成电路学院,无锡 214121
2. 关键矿产成矿与预测全国重点实验室,中南大学,长沙 410083
3. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083
4. 湖南水利水电职业技术学院,长沙 410131
5. 水利工程智能巡检与数字化养护湖南省工程研究中心,长沙 410131
6. 中南大学 AIoT(人工智能物联网)与地质地球物理创新创业教育中心,长沙 410083

1. *School of Integrated Circuits*, *Wuxi University of Technology*, *Wuxi* 214121, *China*
2. *State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *China*
3. *School of Geosciences and Info-Physics*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *China*
4. *Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power*, *Changsha* 410131, *China*
5. *Hunan Engineering Research Center of Intelligent Inspection and Digital Maintenance for Hydraulic Engineering*, *Changsha* 410131, *China*
6. *AIoT Innovation and Entrepreneurship Education Center for Geology and Geophysics*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *China*

摘 要 瞬变电磁法作为一种高效率、无损探测的地球物理探测技术,在工程地质、城市地下空间开发、工程检测等浅层勘探领域具有独特优势.但传统瞬变电磁仪在浅层勘探领域存在着分辨率不足、浅层盲区、设备笨重等问题.为解决这些问题,本文以收发一体式小线圈为基础,研制出一种浅层高分辨多发多收瞬变电磁(MIMO-TEM)接收系统,使全周期精确测量二次场信号成为可能.为拓宽采集系统的测量频带,以对高阻体产生的快速异常响应进行精确捕捉,本文以"AD7760 + XC7K325T"为硬件架构,设计一种高速接收

Abstract Transient Electromagnetic (TEM) method, as a highly and non-destructive geophysical exploration technology, has unique advantages in near-surface exploration fields such as engineering geology, urban underground space development, and engineering detection. However, traditional transient electromagnetic instruments have problems such as insufficient resolution, near-surface blind zones, and cumbersome equipment in near-surface exploration. To address these problems, this paper has developed a near-surface high-resolution TEM receiving system, making it possible to accurately measure the secondary field signal over the entire period. To broaden the measurement frequency band of the acquisition system and accurately capture the rapid abnormal response caused by high impedance objects, this paper designs a high-speed

收稿日期 2025-11-25; **修回日期** 2026-03-18. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 湖南省水利科技重大项目(XSKJ2022068-07,XSKJ2025056-7)、校级自然科学类科研创新团队(ZKTD202403)、"太湖之光"科技攻关(基础研究)(K20241058)、校级博士科研课题基金项目(BT2024-04)、江苏省"双创博士"计划(JSSCBS20221066)、江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(23KJA510010)和江苏省高校科技创新团队项目联合资助.

第一作者简介 淳少恒,男,1988 年生,博士,副教授,主要从事电法仪器研究. E-mail: chunsh123@126.com

***通讯作者** 陈儒军,男,1973 年生,博士,副教授,主要从事地球物理仪器及信号处理. E-mail: chen.rujun@foxmail.com

系统.早期信号反映的是较浅层信息,晚期信号反映的是较深层信息.为对早期强感应信号和晚期微弱感应信号都能精确采集,本文提出一种双通道同步采集方案,其中第一通道通过衰减电路对早期强信号进行采集,当信号幅值低于一定阈值后,第二通道通过模拟电子开关打开接入,并通过多级放大电路对晚期信号进行采集.接收系统不可避免存在直流偏移干扰和随机噪声干扰,本文以双极性发射方波为基础,通过在FPGA中实现叠加算法来实时压制噪声干扰.测试表明,设计的接收系统不仅采样率达到了2.5 MSPS,而且两个通道的短路噪声分别达到了45 μV和0.8 μV,能很好的满足二次场信号的全周期采集需求.再者通过对大小电流对应的电压衰减曲线做归一化处理,发现二者的衰减曲线能很好的融合,这为全周期反映地质结构提供可能.此外,本接收系统电路板尺寸较小,最大只有191 mm×133 mm,并且支持12 V锂电池供电,所以十分适合仪器小型化集成.

关键词 瞬变电磁;接收系统;宽频带;双通道同步采集;叠加算法;FPGA

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0309

CSTR:32085.14.pg2026JJ0309

receiving system based on the hardware architecture of "AD7760 + XC7K325T". The early signals reflect very near-surface and relatively near-surface information, while the late signals reflect near-surface information. To accurately collect both the early strong induction signals and the late weak induction signals, this paper proposes a dual-channel synchronous acquisition scheme. In this scheme, the first channel collects the early strong signals through an attenuation circuit. When the signal amplitude is below a certain threshold, the second channel is enabled by an analog electronic switch and collects late signals through a multi-stage amplification circuit. The receiving system inevitably suffers from DC offset and random noise interference. In this paper, based on the bipolar transmitting square wave, a superposition algorithm is implemented in the FPGA to suppress the noise interference in real time. Test show that the receiving system not only achieves a sampling rate of 2.5 MSPS, but also has short-circuit noise levels of 45 μV and 0.8 μV respectively, which can well meet the full-period acquisition requirements of the secondary field signals. Furthermore, by normalizing the voltage attenuation curves corresponding to large and small currents, it is found that the attenuation curves of the two can be well integrated, which provides the possibility for reflecting geological structures throughout the entire period. In addition, the circuit board size of this receiving system is relatively small, with a maximum size of only 191 mm × 133 mm, and supports 12 V lithium battery power supply, making it very suitable for the instrument miniaturization and integration.

Keywords TEM; Receiving system; Broadband; Dual-channel synchronous acquisition; Superposition algorithm; FPGA

0 引 言

浅层地下空间一般指地表以下0~50 m的范围区域,该区域是人类从事生产活动的主要场所,常见的如隧道工程、水利工程、城市管道、地铁线路等基础工程均属于该范围区域(章强新,2021).近年来,随着国家经济的飞速发展,基础工程建设项目也迎来了跨越式发展.但随着时间的推移,这些基础工程难以避免地逐渐产生了内部损坏.当隐患排查不及时时很容易造成工程事故频发,如煤矿采空区塌陷、拦水堤坝管涌、城市地面塌陷等,从而给我国造成巨大的经济损失和生命财产损失(徐正玉等,2022;Jiang *et al*.,2019;陈兴海等,2014).因此如何对这些隐患进行排查从而有效避免事故发生,具有重大的研究意义.

对这些基础工程的隐患排查是属于浅层地质问题,而通过地球物理方法来获取浅层地下空间信息是解决该类问题最有效的手段.获取浅层地下空间信息主要有弹性波类勘探法和电磁类勘探法(Sheard *et al*., 2005).弹性波类勘探法主要包括地震成像法和面波勘探法.电磁类浅层勘探法主要包括直流电阻率法、自然电场法、探地雷达法和瞬变电磁法.相较于其他方法,瞬变电磁法由于采用非接触式探测,并且具有高工作效率、大探测范围、高横向分辨率、强高阻穿透能力、对低阻敏感、低成本等优势,因此该方法得到业内人员的广泛重视.(薛国强等,2007;刘玮,2023;Jiang *et al*.,2019;Krivochieva and Chouteau,2002).

常规瞬变电磁法主要采用20 m×20 m以上的大回线装置来对地下埋深几百米至上千米的金属矿进行勘探.在野外勘探时,由于作业空间大,大回线装置比较容易展开,但当对上述基础工程勘探,特别是城市地下空间勘探时,巨大的铺设面积将严重影响施工进度,甚至无法开展工作,并且较大的探测深度意味着要使用笨重的设备,不仅会影响工作效率还会造成资源浪费.因此,小回线装置成为浅层瞬变电磁法的更好选择(蒙超,2017).但对于小回线装置而言,想要达到传统大回线装置的探测信号强度,必须增加线圈匝数用以提高线圈等效面积(张华等,2010).多匝数降低了接收机频带宽度,从而导

致二次场感应信号畸变程度加大(张淑婷等,2013).再者,为获得较好的勘探数据质量,小回线装置需要发射线圈与接收线圈布设距离较近.但较近的布设距离带来了强烈的线圈互感,使得发射线圈关断时间延长,一次场信号增强,从而导致接收信号质量降低(杨海燕等,2006;彭良玉,2016;Kozhevnikov *et al.*,2020).为解决这些问题,众多学者尝试从算法和仪器创新上进行问题解决.丹麦Auken提出双矩电流交替发射,同时采集浅部深部信息的思想,并结合跨环消耦技术,研制了拖曳式瞬变电磁(tTEM)系统(Auken *et al.*,2019).吉林大学林君等基于瞬变电磁总场减去理论一次场的思想,研制了ATEM-Ⅱ型瞬变电磁仪(林君等,2004).重庆奔腾公司通过采用高压钳位技术、无线通信技术和GPS同步技术等研制了WTEM-3Q浅部瞬变电磁勘探系统,该系统具有轻便、操作容易、退饱和速度较快等特点(付志红等,2008).重庆璀陆公司通过跨环消耦结构线圈削弱了一次场影响,并结合接收线圈过渡过程数据校准技术、阿尔法超算反演云平台技术研制了FCTEM60-1高分辨率瞬变电磁系统(王浩文,2019).湖南五维公司与中南大学联合研制的HPTEM-18瞬变电磁仪是浅层瞬变电磁仪的典型成果.该仪器基于等值反磁通理论(OCTEM),并利用对称双发射线圈将理论一次场完全消除,从而测量纯二次场有用信息(王亮等,2022).

通过分析发现,为压制一次场信号耦合,上述浅层瞬变电磁仪都基于补偿环线圈、跨环消耦线圈或等值反磁通线圈这类弱磁耦合线圈结构来进行仪器设计.这些仪器虽然能一定程度上压制一次场信号的干扰,但这种设计要么损失了发射等效面积,要么十分依赖线圈精密的结构.精密的结构一方面意味着会大幅度提升线圈的制作成本,对线圈工艺、材料选型、结构设计和线圈安装等都提出了较高的要求,另一方面也意味着材料的老化,使用过程中的结构形变等都会影响一次场消耦效果,稳定性欠佳.再者这些瞬变电磁仪的收发线圈仍然是分开的,这就导致收发线圈之间始终存在互感.除对算法的创新和线圈结构的优化外,在上述仪器中人们似乎对接收系统性能提升的关注并不多.现有的接收系统主要存在两个问题.首先是测量带宽不足,只有500 kHz左右.这种量级的带宽无法对高阻体产生的快速变化异常信号进行精确捕捉.其次是采集系统结构单一,往往只采用单个固定的采集通道对二次场信号进行采集.单个固定的采集通道除要防止早期强电压信号对自身的损坏外,还要尽可能对早中晚期信号,特别是对晚期μV级微弱信号进行精确采集,这显然很难做到设计的平衡.

基于收发一体式小线圈来设计瞬变电磁仪,使解决上述仪器面临的互感影响和线圈结构复杂等问题成为可能(许超等,2024).但该类结构的瞬变电磁仪,由于收发共用一个线圈,这会使得一次场信号影响更强,从而直接导致测量结果的不准确性,无法对浅层盲区勘探实现突破.因此如何设计该类仪器,特别是该类仪器的接收系统,以对全周期二次场信号进行精确采集是面临的基本问题.本文首先采用"高速ADC+大容量FPGA"的硬件架构来拓宽采样带宽,从而对高阻体产生的快速异常响应进行精确捕捉.然后通过双采集通道设计方案来分别测量早期和晚期信号,以应对早期信号强和和晚期信号微弱的挑战.最后通过在FPGA内实现叠加算法来压制多种噪声干扰,并在发射系统的配合下,完成大小电流对应的二次场信号的采集、归一化和融合.在融合曲线中,以小电流早期信号反映甚浅层和较浅层信息,以大电流晚期信号反映浅层信息,从而为获取全周期信号提供可能.本文是对课题组研制的MIMO-TEM的补充,主要从接收系统设计方面介绍对全周期二次场信号进行采集的方案和具体实现方法.MIMO-TEM的发射系统已在相应文献(淳少恒等,2025)中做出详细说明,该发射系统支持多种电流发射,而本文采用多通道方式进行接收,二者一起构成MIMO-TEM.

1 接收系统设计难点

接收系统作为瞬变电磁仪的重要组成部分,它的性能很大程度上就决定了仪器的整体水平.目前,瞬变电磁接收系统的研制主要面临以下几个挑战,具体如下.

(1)全周期采集通道的设计:瞬变电磁的早期信号反映的是浅层地质信息,晚期反映的是深层地质信息.但该信号的动态范围极大,可以从早期V级衰减到晚期μV级,幅值跨度达6个数量级.再者,该信号变化迅速,特别是高阻体引起的异常响应信号,从早期到晚期衰减时间仅有若干个ms,甚至是若干个μs.因此,如何选择合适的ADC,并在ADC位数一定的情况下,如何设计采集通道来对迅速变化的瞬变电磁信号进行高精度全周期采集是面临的第一个挑战.

(2)高速并行处理FPGA的设计:瞬变电磁信号

变化迅速,要对该信号进行高精度全周期采集,就必须选用多个快速 ADC 进行 MHz 级高速同步采集,同时也就会产生大量的高迸发数据.因此,如何设计 FPGA 电路来控制多路高速 ADC 同步采集,并应对瞬时高迸发数据是面临的第二个挑战.

(3)采集噪声抑制的设计:当采用高速 ADC 对瞬变电磁信号进行采集时,ADC 自身的噪声也就越大.再者,ADC 及其采用通道还存在不同程度的直流偏移干扰和随机噪声干扰.因此,如何在 FPGA 内设计噪声抑制算法以实时压制不同种类的噪声是面临的第三个挑战.

2 总体方案的设计

图 1 所示为 MIMO-TEM 瞬变电磁仪总体设计.该电磁仪的发射部分已在相应文献(淳少恒等,2025)中做了详细介绍,这里不再赘述.设计的 MIMO-TEM 瞬变电磁仪的多发性主要体现在该仪器的发射系统可以切换发射大小两种电流,多收性主要体现在接收系统采用双采集通道同步采集二次感应场信号.以多发和多收为基础,再通过归一化等处理,设计的仪器可实现二次场信号从早期至晚期的全周期采集.由于各电路板之间已做隔离处理,发射系统与本接收系统配套使用时只需通过线缆和连接器相互连接即可,所以十分方便.实际工作时,所有的命令均通过安卓 APP 下发,接收系统完成命令接收后则对命令进行解析,然后把命令分发至发射系统或者自身的其他功能模块.图 2 所示为接收系统电路结构框图.由此图可知,该接收系统主要由安卓 APP、嵌入式控制板和信号采集板三部分组成.各模块的功能如下.

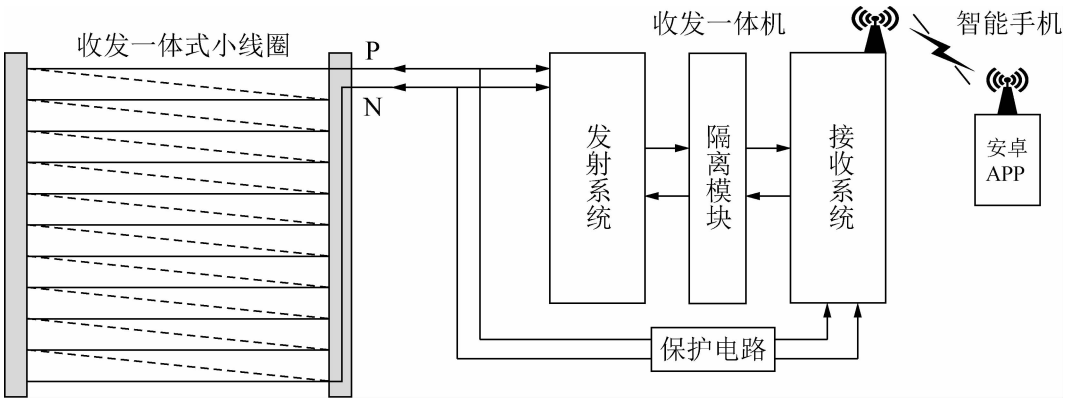


图 1 MIMO-TEM 总体设计方案

Fig. 1 Design scheme of MIMO-TEM

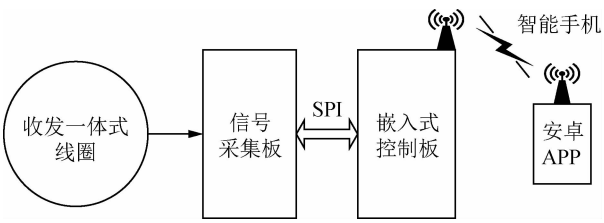


图 2 接收系统电路结构

Fig. 2 Circuit structure of receiving system

安卓 APP:该 APP 是整个系统的核心控制单元,包括仪器的参数配置、命令打包和下发、采集数据接收和存储、数据抽道、数据实时成图以及大小电流数据融合等.为保持通信的稳定性,该 APP 支持采用蓝牙和 WIFI 两种无线协议进行通信,其中蓝牙协议负责小容量数据传输,如仪器参数配置、开始和停止等命令数据,WIFI 协议负责大容量数据传输,如高速 ADC 实时采集的数据.

嵌入式控制板:该电路板是数据传输的中转站,起桥接安卓 APP 和数据采集板之间通信链路的作用.具体功能为,控制蓝牙模块接收安卓 APP 下发的配置命令和采集控制命令,对命令解析后再分发至不同的模块;接收采集板上传的采集数据,然后对采集的数据进行本地存储,并控制 WIFI 模块把数据上传至安卓 APP.

信号采集板:该电路板是整个接收系统的具体执行单元.具体功能为,对控制板下发的命令进行解析,根据解析命令完成如 ADC 采样率的配置,采集通道增益放大倍数的控制,以及 ADC 的启停等;对采集的数据进行缓存和叠加计算等处理,然后把处理后的数据上传至嵌入式控制板.

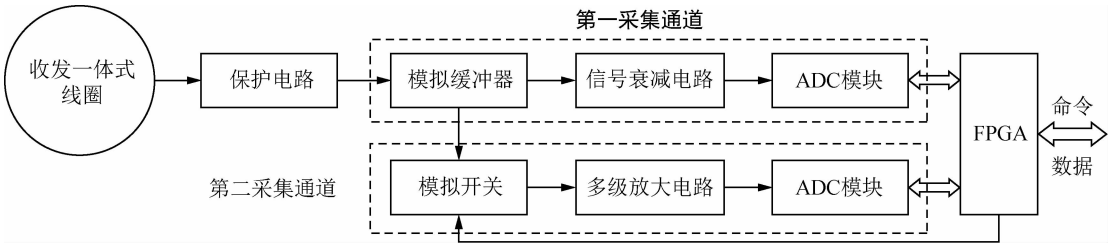


图 3 采集板电路结构

Fig. 3 Circuit structure of acquisition board

3 关键问题的解决

3.1 全周期采集通道的设计

图 3 所示为采集板电路结构. 由此图可知,该采集板主要包括保护电路,第一采集通道,第二采集通道和 FPGA 控制器. 各模块的功能如下.

保护电路:对于收发一体式线圈而言,保护电路需具有过压保护、ESD 防护和限流三种功能. 在发射电流关断瞬间,收发一体式线圈会产生很强的反向感应电压,此电压会对采集通道造成损伤. 设计中采用气体放电管,TVS 管,开关二极管和电阻相结合的形式来对采集通道进行保护,其中气体放电管用于泄放低频高能量脉冲,TVS 管用于静电放电防护、电压钳位,开关二极管用于电压钳位、信号整形和 ESD 防护功能,电阻则用来做限流处理.

第一采集通道:为对瞬变电磁信号进行全周期采集,采用双通道同步采集的方式进行设计,二者共用一个输入端. 第一采集通道用来对早期信号进行采集,该通道由于包含衰减电路,可对早期强电压信号进行采集.

第二采集通道:该通道通过模拟开关与第一采集通道隔开,用来对晚期信号进行采集. 由于晚期信号较弱,当 FPGA 判断信号幅值小于设定的阈值后,则自动打开模拟开关,并控制多级放大电路对晚期弱信号进行放大后采集.

FPGA 控制器:该控制器是采集板的控制核心. 具体功能包括,接收嵌入式控制板下发的配置命令和控制命令等,并对命令进行解析,然后分发至相应的模块进行控制;控制双路高速 ADC 进行同步采集,并对采集的数据进行处理,然后上传至嵌入式控制板中.

3.1.1 第一采集通道

模拟缓冲器、信号衰减电路和 ADC 一起构成了第一采集通道. 要对早期强信号进行采集,需要对信号进行隔离和衰减处理后才能接入到 ADC 中.

首先是模拟缓冲器的设计. 图 4 所示为设计的差分模拟缓冲器. 缓冲器选用 ADA4898-2 这款差分放大器来设计,并被设计成电压跟随电路. 该放大器最大工作电压范围为 ±16 V,输入噪声密度为 0.9 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$,偏置电流为 0.1 μA,能很好的满足缓冲和放大的需求. 模拟缓冲器主要用来隔离前端输出阻抗对衰减电路的影响.

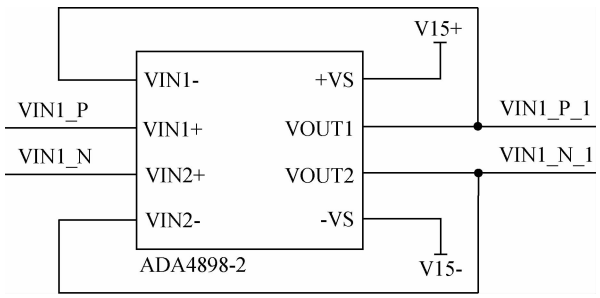


图 4 差分模拟缓冲器

Fig. 4 Differential analog buffer

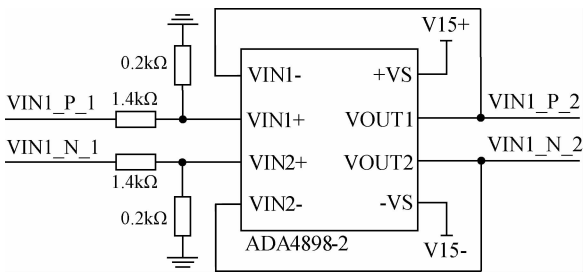


图 5 信号衰减电路

Fig. 5 Signal attenuation circuit

然后是信号衰减电路的设计. 瞬变电磁早期信号较强,很容易超过 ADC 的量程,因此需设计衰减电路对早期信号进行衰减. 图 5 所示为设计的信号衰减电路. 信号衰减可以在集成运放的负反馈端通

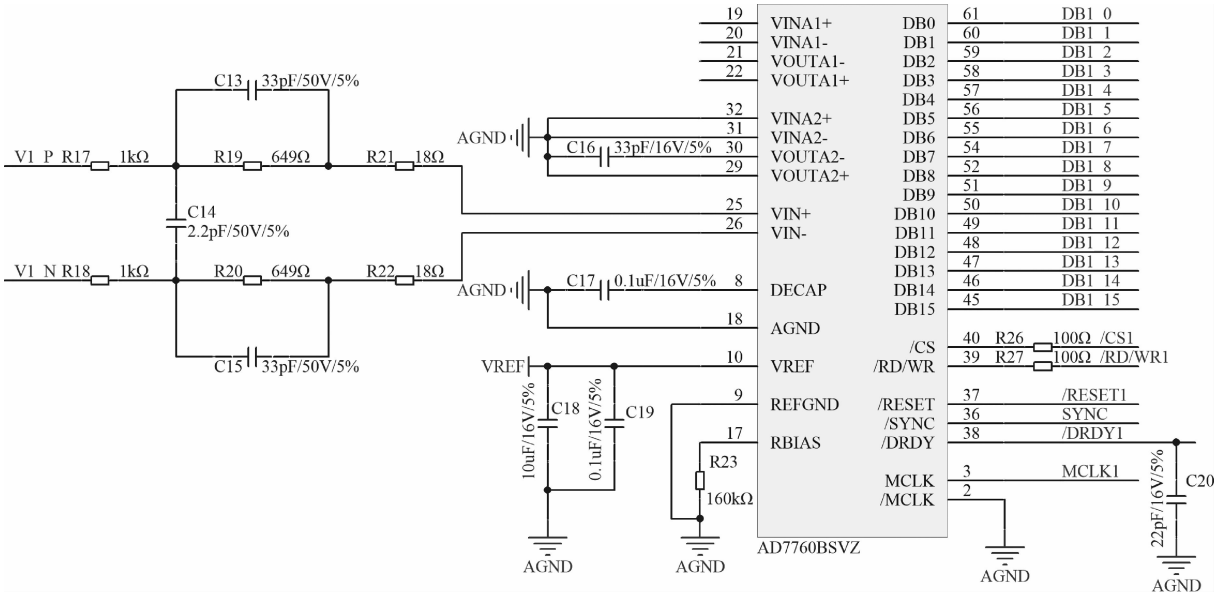


图 6 ADC 模块的电路原理图

Fig. 6 Circuit schematic of ADC module

过匹配相应电阻来完成设计. 但这种设计方式容易让信号产生振荡. 本次设计采用电阻分压和电压跟随器联合的方式来完成. 首先通过 1.4 kΩ 和 200 Ω 两个高精度电阻完成信号的 1/8 衰减,然后再把一片集成运放设计成电压跟随器来隔离分压电阻与 ADC 输入端. 这里的电压跟随器是利用集成运放的较大输入阻抗来隔离 ADC 输入阻抗对分压信号的影响. 设计中电压跟随器同样选用 ADA4898-2 这款差分放大器来设计.

最后是 ADC 模块的设计. 图 6 所示为 ADC 模块的电路原理图. 该模块包括 ADC 和与之配套的抗混叠滤波器. ADC 选用 ADI 公司的 AD7760,该器件是一款 24 位的 Σ-Δ 型 ADC,不仅最高采样率可达到 2.5 MSPS,而且信噪比高,即使采样率为 2.5 MSPS 时也可达到 100 dB,能很好地满足对快速变化瞬变电磁信号的高精度采集需求. 当 ADC 完成数据采集后,通过 16bits 并行端口把数据输出给 FPGA. 需要说明的是,第一采集通道的 ADC 模块与第二采集通道的 ADC 模块是完全一样的.

3.1.2 第二采集通道

第二采集通道主要包括模拟开关和四级放大电路. 为能精确捕获快速变化的瞬变电磁信号,模拟开关的切换速度最好要达到 ns 级. 实际设计中选用 dg469 这款器件进行设计. 该器件的开关速度不仅达到了 ns 级,一般开启时间为 120 ns,最大为 340 ns,而且可在 ±15 V 宽电压下工作,导通电阻最大 8 Ω,能很好地满足设计需求. 图 7 所示为双通道切换电路. FPGA 通过控制 dg469 的 SW 端的高低电平来完成第二采集通道的打开和关闭.

然后是四级放大电路的设计. 瞬变电磁信号变化量级大,晚期信号常在 μV 级. 而选用 ADC 的分辨率也在 μV 级,因此需对该信号放大后才能进行有效采集. 图 8 所示为设计的四级差分放大电路. 该电路每级放大 5 倍,一共放大 625 倍,以对不同幅值的微弱信号进行放大. 电路中每级放大器均选用 ADA4898-2 这款器件来设计,信号继电器选用 SIL03-1A72-71D 这款器件来设计,该继电器内阻只有 0.1 Ω,能很好的满足放大控制的需求. FPGA 通过 CTR 管脚控制继电器闭合和断开. 当继电器闭合时,对应的放大电路不对信号进行放大;当继电器断开时,对应的放大电路对信号放大 5 倍. 需要说明的是,多级放大电路不是同时放大,而是 FPGA 根据当前信号的幅值自适应逐级打开,从而对不同幅值的信号进行放大. 在放大电路中,控制放大倍数的电阻取值较小,各电阻的阻值分别为 50 Ω 和 100 Ω. 这种设计是为了增加输入信号的电流,以提升信号的抗干扰能力.

3.2 FPGA 电路的设计

当双路 ADC 完成瞬变电磁信号的采集后,需把数据输入到 FPGA 中进行处理. 为应对快速变化的

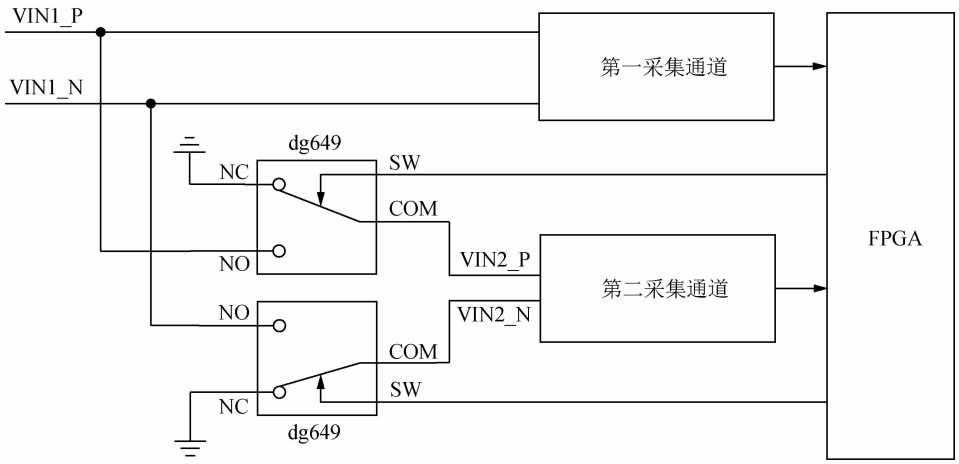


图 7 双通道切换电路

Fig. 7 Dual-channel switching circuit

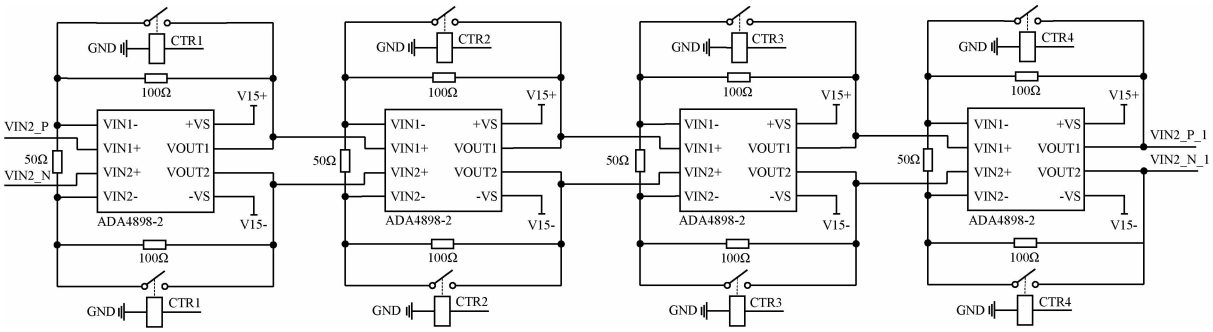


图 8 四级差分放大电路

Fig. 8 Fourth-order differential amplifier circuit

瞬变电磁信号,设计中双通道 ADC 均采用 2.5 MSPS 最高采样率进行数据采集. ADC 的位数为 24bits,双通道 ADC 每秒产生的数据量为 120Mbits,因此如何设计 FPGA 电路是面临的第二个挑战. 实际中,选择 Xilinx 公司生产的 Kintex-7 系列 XC7K325T-2FFG900I 这款 FPGA 来进行主控电路的设计. 该 FPGA 芯片支持多种电平标准,IO 管脚丰富,内部资源充足,能很好的满足本次设计的需求. 图 9 所示为 FPGA 内部电路结构. 由此图可知,FPGA 内部主要由 SPI 接收单元、内核单元、采集控制单元、RAM 缓存单元、FIFO 缓存单元和 SPI 数据发送单元组成. 各单元的功能如下.

SPI 数据接收单元:该单元通过 SPI 协议接收嵌入式控制板下发的配置和控制命令数据,完成接收后,把数据输出到内核单元.

内核单元:该单元采用一个状态机进行设计,是 FPGA 的控制核心. 主要功能包括接收 SPI 接收单元发送的数据,并对接收的数据进行解析和命令分发,以触发对应的功能单元进行工作;接收 2 个通道的采集数据,并把这些数据发送到 RAM 缓存单元为数据处理做准备;根据第一采集通道的数据判断当前时刻信号的幅值,当信号的幅值小于设置的阈值时则打开第二采集通道的模拟开关进行数据采集;当模拟开关打开后,根据第二采集通道数据所处的范围,自适应调节第二采集通道的放大倍数.

采集控制单元:该单元由 ADC 寄存器配置和采集数据读取两个小单元组成. ADC 寄存器配置单元用来对 ADC 内部的一些寄存器,如采样率和滤波器选择等寄存器,进行配置. 采集数据读取单元用来读取 ADC 采集的数据,并把获取的数据发送至内核单元.

RAM 缓存单元:该单元由两个并列的 RAM 缓存器和 RAM 控制器组成,两个缓存器分别应对第一和第二采集通道. 这种设计方式能很好的利用

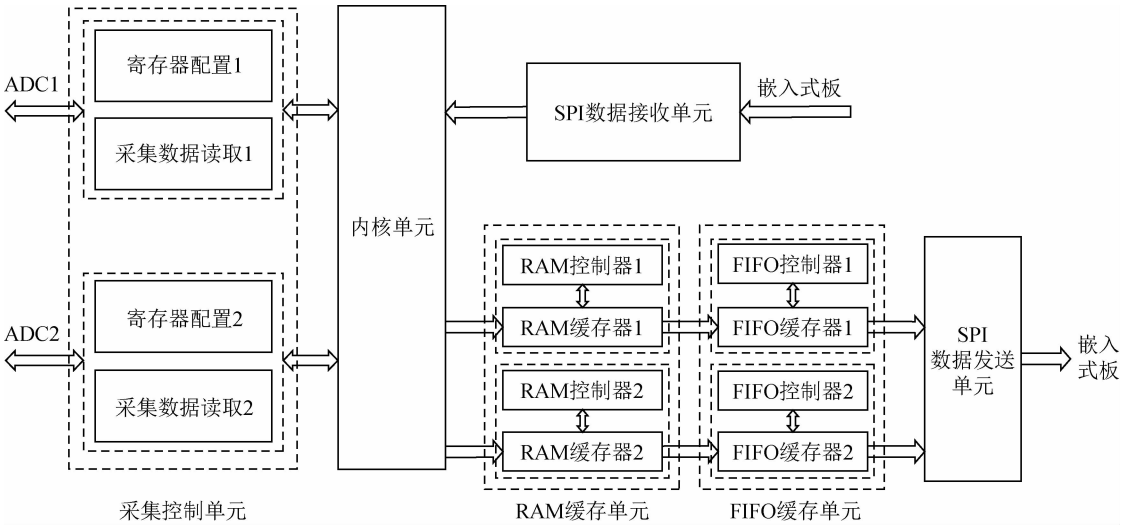


图 9 FPGA 内部电路结构

Fig. 9 Internal circuitry structure of FPGA

FPGA 的并行处理能力,从而高效应对高迸发数据. RAM 缓存器通过调用 FPGA 内的 Block RAM 这个 IP 核进行设计,用于对数据进行缓存. RAM 控制器以数据处理算法为基础,来对 RAM 缓存器中不同地址的数据进行读取、计算、存储和输出. 实际工作时,当 RAM 控制器检测到有采集数据输入,就立刻提取 RAM 相应地址的数据,然后与输入的数据做叠加计算,完成计算后再存储到相应地址的空间中. 当达到设定的叠加次数后,RAM 控制器就把最终的叠加数据输出到 FIFO 缓存单元,以完成数据上传. 具体的 RAM 控制器工作方式和数据处理算法会在后文做详细介绍.

FIFO 缓存单元:该单元同样由两个并列的 FIFO 缓存器和 FIFO 控制器组成,分别临时存储两个 RAM 缓存器输出的叠加数据,并把叠加数据输出到 SPI 发送单元. FIFO 缓存器通过调用 FPGA 内的 FIFO 这个 IP 核进行设计,设计比较方便. FIFO 控制器则用来控制 FIFO 缓存器的数据读写. 具体为,该控制器一方面根据 FIFO 缓存器写满标识位状态,来确定是否把叠加数据写入到 FIFO 缓存器中. 当 FIFO 缓存器未写满时,则写入叠加数据;当已写满时,则开始等待直到写满标识位被拉低,然后再写入. 另一方面根据 SPI 数据发送单元的空闲标识位来确定是否把 FIFO 缓存器中的数据读出并输出到 SPI 数据收发单元. 当发送单元空闲时,则直接读取叠加数据输出到发送单元;当非空闲时,则开始等待直到空闲标识位为高电平,然后才读取叠加数据输出到发送单元.

SPI 数据发送单元:该单元首先把双采集通道的叠加数据进行并行读取,完成数据的并行转串行操作后,通过 SPI 协议把数据上传至嵌入式控制板.

3.3 采集噪声抑制的设计

当对瞬变电磁信号进行采集时,采集精度会面临多个因素的影响,主要有采集通道中直流偏移的影响和随机噪声的影响. 如何设计电路控制系统和算法来解决这些问题是面临的第三个挑战.

首先是直流偏移的压制. 采集通道中各集成运放、模拟开关和 ADC 等都存在不同程度的直流偏移. 通过测试发现,在某一时间段内,该直流偏移量基本为一个变化较小的有界区间. 为解决这一问题,本文首先要求发射系统采用双极性方波进行发射,然后采集系统完成二次场信号采集后,通过对前后两次采集结果做差分运算从而有效压制直流偏移. 发射系统具体设计方法参考淳少恒等(2025). 图 10 所示为发射的双极性方波. 实际工作时,在发射波形关断瞬间往后延时一定时间才开始启动采集,这种设计是为了避免关断瞬间产生的强震荡信号. 由于采样率一定,发射的双极性波形的频率也一定,因此通过程序可控制每次关断后采集的数据量也是一定的. 以第一个周期为例,正下降沿关断后采集的数据记为 data1_p[1:N],负下降沿关断后采集的数据记为 data1_n[1:N],这里的 N 是根据发射频率和 ADC 采样率确定的采集数据量. 数据 data1_p 和数据 data1_n 中都包含有直流偏移,因此通过对序列

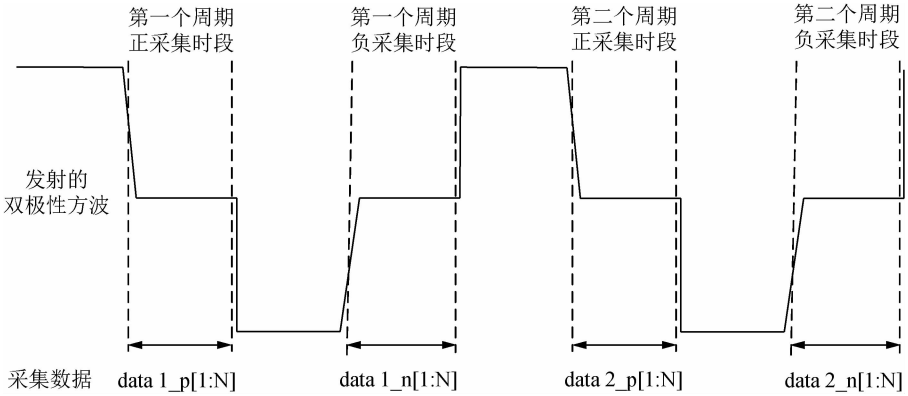


图 10 双极性方波

Fig. 10 Bipolar square wave

data1_p[1:N]和 data1_n[1:N]做差分计算就能有效压制直流偏移的影响.

然后是随机噪声的压制. 随机噪声由多方面因素导致,如采集系统中电子元器件的热噪声,直流偏移量的小幅度随机抖动,以及外界信号的随机干扰等. 实际设计中采用多次叠加的方式进行随机噪声压制. 在一个完整的双极性方波周期内,前后两次数据的符号是相反的,让这两次数据做差分运算,除压制直流偏移噪声外,还可完成采集数据的叠加,从而压制随机噪声. 以第一个双极性方波为例,data1_p[1:N]记录的是正下降沿关断后的二次场信号,这时的信号为正向信号,data1_n[1:N]记录的是负下降沿关断后的二次场信号,这时的信号为负向信号,因此通过差分运算能完成数据的叠加. 当一个周期内的叠加运算完成后,下一个周期到来时需要考虑周期间的数据叠加. 以第一和第二个双极性方波为例,记第一个周期的叠加数据为 data1[1:N]. 当完成第二个周期内正向数据 data2_p[1:N]的采集后,就立刻用 data1[1:N]加上 data2_p[1:N];当完成第二个周期内负向数据 data2_n[1:N]的采集后,再用之前叠加好的数据减去 data2_n[1:N],从而得到 data2[1:N]. 按照这种方式执行,直到完成设定的叠加次数即可. 最后用最终叠加数据除以叠加次数,得到的数据即为该测点的最终数据.

最后是叠加算法的 FPGA 实现. 图 11 所示为叠加算法的流程. 当完成初始化后,该算法模块会通过标识信号 en_adc_ok 检测 ADC 是否有数据产生. 当有数据产生时,则继续判断该数据是否为第一个周期的正向数据. 如果是,则逐个把采集数据从 RAM 缓存器的低位地址存储到高位地址. 对于其他时段的数据,若采集数据为正向采集数据,则读出缓存器中的数据,然后与采集数据相加后再存入缓存器的

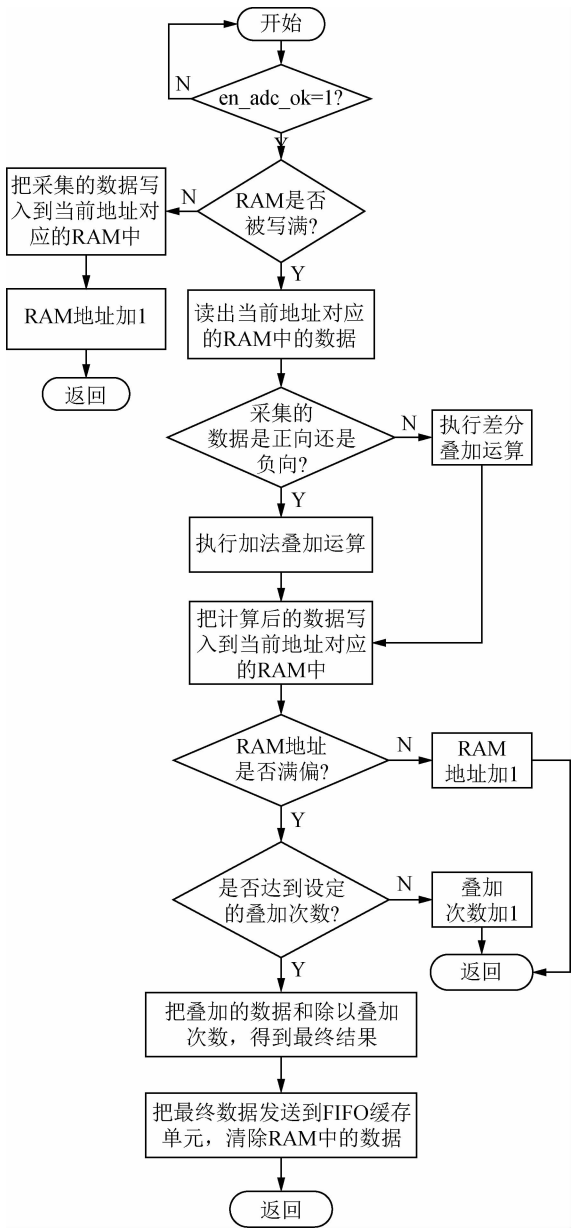


图 11 叠加算法的流程

Fig. 11 Process of superposition algorithm

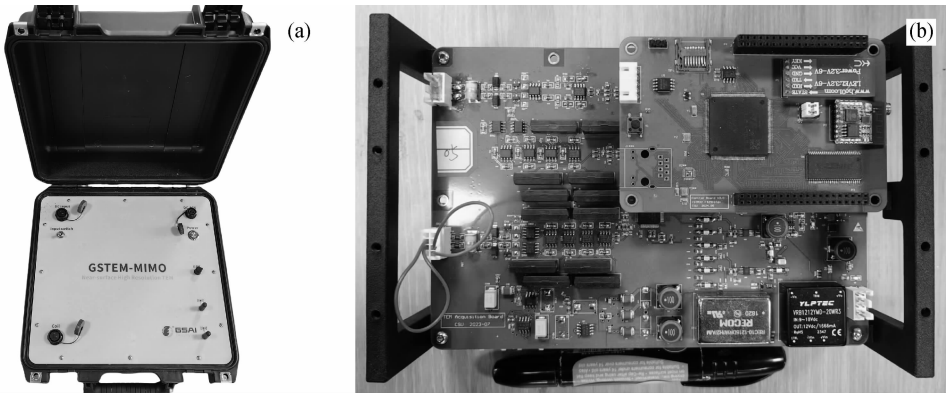


图 12 瞬变电磁仪

(a) MIMO-TEM;(b)接收系统.

Fig. 12 TEM instrument

(a) MIMO-TEM;(b) Receiving system.

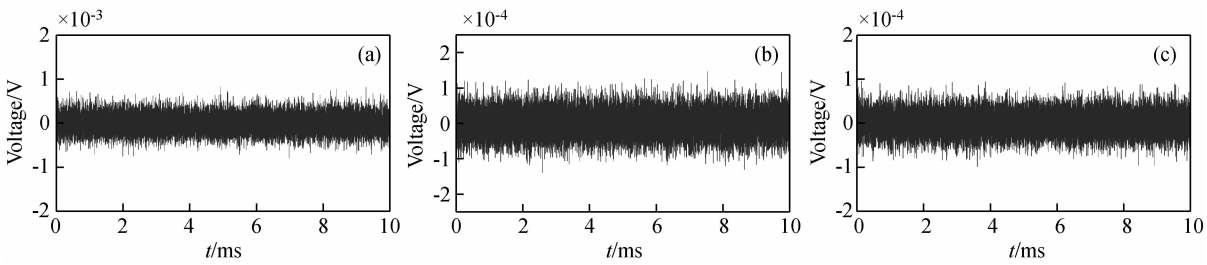


图 13 第一采集通道的短路噪声

(a)不叠加;(b)叠加 100 次;(c)叠加 200 次.

Fig. 13 Short-circuit noise of first channel

(a) No superposition;(b) Superimpose 100 times;(c) Superimpose 200 times.

原地址中.若为负向采集数据,则读出缓存器中的数据,然后减去采集数据后再存入缓存器的原地址中.当完成设定的叠加次数后,RAM 控制器则把缓存器中的数据逐个读出,除以叠加次数后再输出到 FIFO 缓冲器以进行数据上传.

4 结果测试

图 12 所示为本次设计的瞬变电磁仪,其中(a)为 MIMO-TEM,(b)为接收系统.接收系统由嵌入式控制板和信号采集板组成,其中嵌入式控制板尺寸为 111 mm × 73 mm,信号采集板尺寸为 191 mm × 133 mm,尺寸较小,十分适合仪器小型化设计.

4.1 短路噪声测试

采集板的短路噪声很大程度上反映了接收系统的电压分辨率.在测量短路噪声时,首先把采集板的差分采集端与地短接,两个通道 ADC 的采样率均设置为 2.5 MSPS,然后在不同叠加次数下测量两通道的短路噪声.图 13 和图 14 分别为第一采集通道和第二采集通道在叠加 1、100 和 200 次时的短路噪声.由这两幅图可知,通过一定次数的叠加,两个通道的短路噪声均有较大幅度的提升,几乎均提高一个数量级左右.再者,第二采集通道的短路噪声明显小于第一采集通道.在叠加 200 次时,第一采集通道的短路噪声峰值约为 50 μV,而第二采集通道的短路噪声峰值约为 0.8 μV.分析可知,这是因为第一采集通道是通过较大电阻实现的信号分压,而第二通道所使用的电阻较小,阻值的差异导致了噪声的不同.但这一结果与设计相符,这是因为第一采集通道主要负责早期强电压信号的采集,而第二采集通道主要负责晚期微弱信号的采集,即使第一采集通道的短路噪声较大,二者通过程序的调配,能实现对全周期瞬变电磁信号的精确采集.

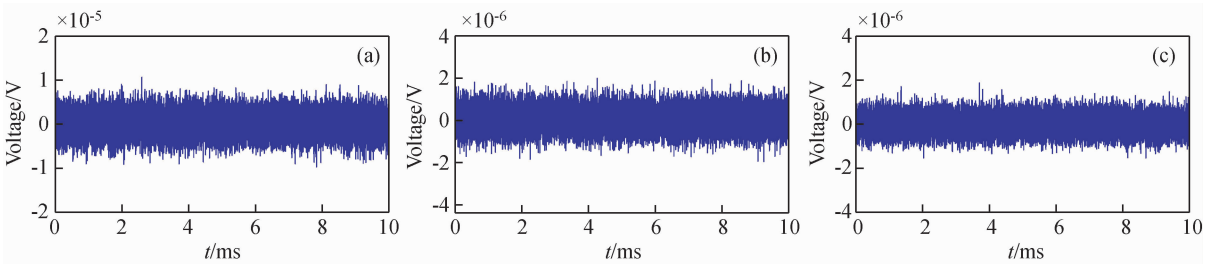


图 14 第二采集通道的短路噪声

(a)不叠加;(b)叠加 100 次;(c)叠加 200 次.

Fig. 14 Short-circuit noise of second channel

(a) No superposition; (b) Superimpose 100 times; (c) Superimpose 200 times.

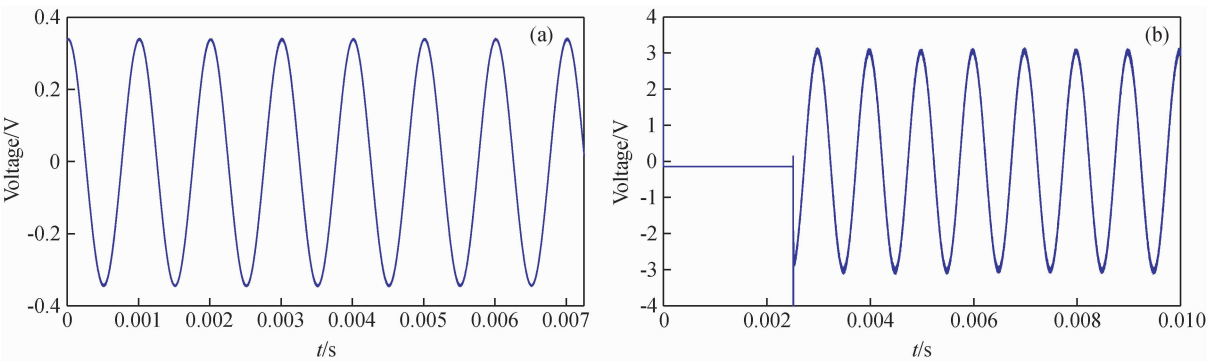


图 15 正弦波采集结果

(a)第一通道的波形;(b)第二通道的波形.

Fig. 15 Sine wave acquisition result

(a) Waveform of first channel; (b) Waveform of second channel.

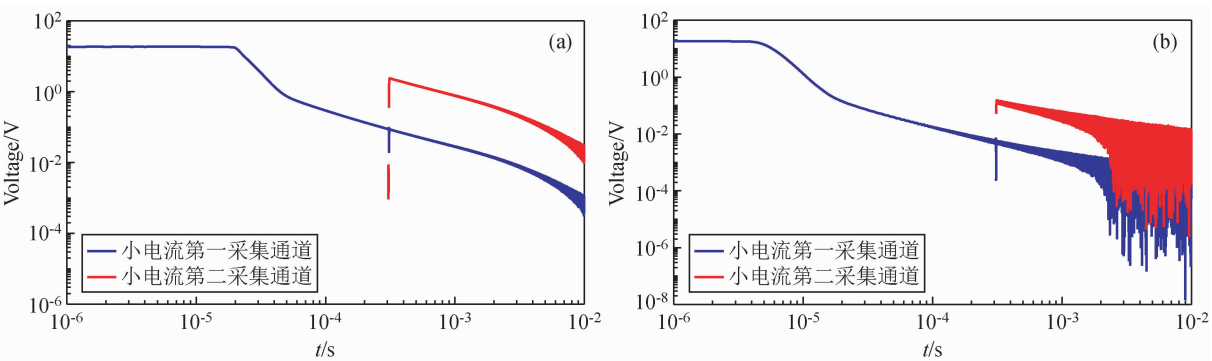


图 16 感应电压衰减曲线

(a)大电流;(b)小电流.

Fig. 16 Induction voltage attenuation curve

(a) Large current; (b) Low current.

4.2 采集功能测试

为检测接收系统功能的正确性和稳定性,本次测试采用信号发生器向接收系统发送正弦波. 正弦波的参数为频率 1 kHz,第一通道输入的峰峰值为 30 mV,第二通道输入的峰峰值为 10 mV. 接收系统的参数为,叠加次数设置为 25 次,第一采集通道默认 1/8 倍放大,第二通道开启时间设置为 2.5 ms,放大倍数设置为 625 倍. 图 15 所示为采集结果,其中

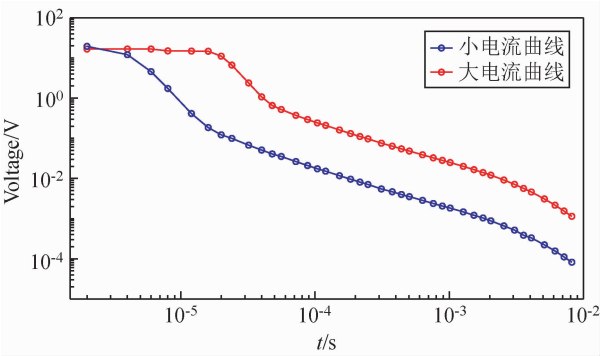


图 17 大小电流滤波后电压衰减曲线

Fig. 17 Voltage attenuation curve after filtering of large and small currents

(a)为第一通道的采集结果,(b)为第二通道的采集结果.由此图可知,设计的接收系统能对信号正确采集.

4.3 整机性能测试

已设计的发射系统支持 14.6 A 和 1.15 A 大小两种电流切换发射.本次测试,发射机采用这两种大小电流发射,发射频率为 25 Hz.接收系统采样率为 2.5 MSPS,采样时间 10 ms,叠加次数 25 次,所使用线圈的等效面积为 24.96 m^2.

4.3.1 室内测试

首先是室内测试.测试时将线圈和仪器均置于室内,启动仪器开始测量.图 16 所示为测量的感应电压衰减曲线,其中(a)为大电流对应的衰减曲线,(b)为小电流对应的衰减曲线.通过此图可知,相比小电流曲线,大电流曲线有一个更长的平稳期.这是大电流的早期感应电压更强,持续时间也更久,从而更长时间触发采集前端的钳位电路导致的.再者即使在晚期,也能观察到大电流较好的衰减趋势,而小电流的衰减曲线则逐渐被噪声覆盖.

当对同一测点进行勘探时,大小两种发射电流的感应电压衰减曲线应该是近乎平行的.图 17 所示为大小两种电流滤波后的电压衰减曲线.这里的滤波是对采集的原始数据进行抽道叠加.由此图可知,二者的电压衰减曲线近乎平行.这表明设计的瞬变电磁仪能很好的完成信号的激励和响应采集需求.需要说明的是,在实验室环境下,楼层上下布满了钢筋等低阻体,从而导致测量的衰减曲线往上拱.

瞬变电磁早期衰减信号反映的是较浅层地质结构情况,晚期反映的是较深层情况.通过图 16 和图 17 可知,对于早期信号,当为大电流发射时,由于一次场耦合较强,导致早期信号被长时间钳位,这使得该早期信号是无效的.而当采用小电流发射时,由于一次场较弱,触发钳位时间较短,这表明该早期信号是部分可被使用的.对于晚期信号,大电流晚期信号较强,而小电流晚期信号易被噪声覆盖,这表明可采用大电流的晚期信号来分析较深层的地质结构.综合分析可知,可把大小两种电流下的衰减曲线进行融合,从而获得从早期到晚期的全周期衰减曲线.图 18 所示为大小两种电流归一化后的电压衰减曲线.由此图可知,在中晚期一次场影响较弱后,大小两种电流的衰减曲线近乎完全重合.对于早期信号可以采用小电流的早期信号直接替换,这样就可得到一个近乎全周期的衰减曲线,从而反映从较浅层到较深层的整个地质结构情况.需要说明的是,具体的归一化方法为,用滤波后的电压衰减曲线除以发射磁矩即可.

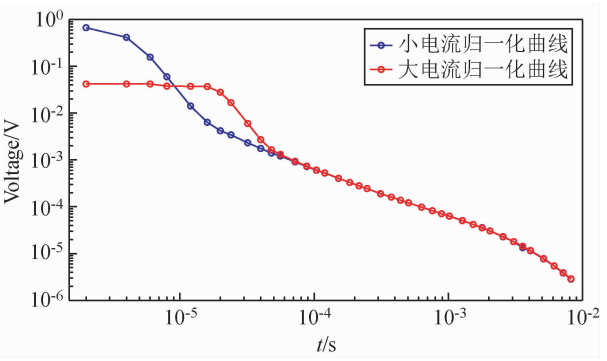


图 18 大小电流归一化的电压衰减曲线

Fig. 18 Normalized voltage attenuation curves for both large and small currents

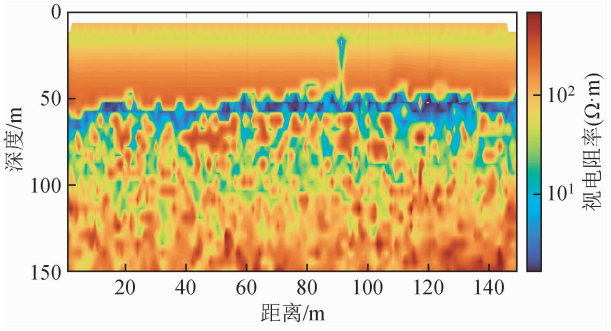


图 19 视电阻率反演结果

Fig. 19 Apparent resistivity inversion result

4.3.2 户外测试

然后是户外测试.户外测试选择在长沙某山的

一条路上.该路段地势平坦,仅在中间区域有一处排水管道.测试时,每隔 2 m 测试一个点,一共测试 75 个点.图 19 为视电阻率反演结果.通过此图可知,在 90 m 附近有一处较明显的低阻异常.而该位置是排水管道,因此可判定该异常是由排水管道导致,与实际情况相符.这也进一步表明,本接收系统具有较高的测量精度,能对较微弱的异常响应进行采集.

5 结 论

为能对浅层区域采用多匝收发一体式小线圈进行精确勘探,本文以"AD7760 + XC7K325T"为硬件架构,设计一种 MIMO-TEM 的接收系统.该系统不仅采样频带宽,达到了 2.5 MSPS,而且由于采用大容量 FPGA 芯片 XC7K325T 进行底层控制,所以能很好的应对高容量迸发数据,为数据稳定性提供保障.浅层瞬变电磁仪早期信号反映的是较浅层信息,中晚期信号反映的是较深层信息.为能对全周期的二次场信号进行精确采集,本文设计一种双通道采集方案,其中第一采集通道通过设计 1/8 衰减电路来对早期强电压信号进行采集,第二采集通道通过设计四级差分放大电路来对晚期微弱信号进行采集.第二通道并非全周期接入,而是当信号低于一定幅值后通过 ns 级响应的模拟开关打开接入.为压制采集通道中直流偏移干扰和热噪声等随机干扰,以双极性方波为基础,在 FPGA 中以 RAM 缓存器为数据暂存设计一种叠加算法.测试表明,即使在 2.5 MSPS 的采样率下,200 次叠加后接收系统的短路噪声分别达到了 45 μV 和 0.8 μV,能很好的满足二次场信号的全周期采集,并且归一化后大小电流对应的电压衰减曲线能较好的融合.在融合曲线中,以小电流早期信号反映甚浅层和较浅层信息,以大电流晚期信号反映浅层信息,这为全周期反映地质结构提供可能.此外,本接收系统电路板尺寸较小,最大只有 191 mm × 133 mm,并且支持 12 V 锂电池供电,所以十分适合仪器小型化集成.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Auken E, Foged N, Larsen J J, *et al*. 2019. tTEM-A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface. Geophysics, 84(1): E13-E22, doi: 10.1190/GEO2018-0355.1.

Chen X H, Zhang P S, Jiang X Y, *et al*. 2014. The development of geophysics detecting techniques on leakage in dam reservoir. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 11(2): 160-165, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.02.006.

Chun S H, Wang F F, Chen R J, *et al*. 2025. Development of transient electromagnetic transmitter based on SiC MOSFET for high-resolution near-surface. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(1): 358-371, doi: 10.6038/pg2025II0069.

Fu Z H, Zhao J L, Zhou L W, *et al*. 2008. WTEM fast turn-off transient electromagnetic detection system. Chinese Journal of Scientific Instrument (in Chinese), 29(5): 933-936, doi: 10.19650/j.cnki.cjsi.2008.05.007.

Jiang Z H, Liu L B, Liu S C, *et al*. 2019. Surface-to-underground transient electromagnetic detection of water-bearing goaves. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(8): 5303-5318, doi: 10.1109/TGRS.2019.2898904.

Kozhevnikov N O, Sharlov M V, Stefanenko S M. 2020. Turning off low and high currents in a transmitter loop used in the transient electromagnetic method. Geophysical Prospecting, 68(5): 1676-1688, doi: 10.1111/1365-2478.12942.

Krivochieva S, Chouteau M. 2002. Whole-space modeling of a layered earth in time-domain electromagnetic measurements. Journal of Applied Geophysics, 50(4): 375-391, doi: 10.1016/S0926-9851(02)00164-7.

Lin J, Ji Y J, Yu S B, *et al*. 2004. The ATEM-II transient electromagnetic system and its application. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 28(6): 496-499.

Liu W. 2023. Application of transient electromagnetic method in geophysical exploration. Energy and Energy Conservation (in Chinese),(3): 219-221.

Meng C. 2017. Study on transient electromagnetic method of large loop source prospecting shallow strata [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China Coal Research Institute.

Peng L Y. 2016. Transient electromagnetic transmitting system design based on multi-turn and small coil [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.

Sheard S N, Ritchie T J, Christopherson K R, *et al*. 2005. Mining, environmental, petroleum, and engineering industry applications of electromagnetic techniques in geophysics. Surveys in Geophysics, 26(5): 653-669, doi: 10.1007/s10712-005-1760-0.

Wang H W. 2019. Research on transient electromagnetic small-loop detection technology [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chongqing: Chongqing University, doi: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.001240.

Wang L, Long X, Wang T T, *et al*. 2022. Application of the opposing-coils transient electromagnetic method in detection of urban shallow cavities. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 46(5): 1289-1295, doi: 10.11720/wtyht.2022.1467.

Xu C, Yin H, Chen R J, *et al*. 2025. Transceiver integrated coil and its buffer design for near-surface TEM instrument. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(5): 2334-2347, doi: 10.6038/pg2025II0257.

Xu Z Y, Fu Z H, Liao X, *et al*. 2022. Application analysis of detailed detection of diseases based on small loop transient electromagnetic method. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(2): 892-901, doi: 10.6038/pg2022FF0187.

Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2007. The progress of TEM in theory and application. Progress in Geophysics (in Chinese), 22(4): 1195-1200.

Yang H Y, Yue J H, Liu Z X. 2006. Theoretical study of inductance effect with multi-axial coils for TEM in underground mine. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 36(S1): 168-171, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.2006.s1.038.

Zhang H, Cao J, Sun H. 2010. The analysis and research of transient electromagnetic configuration of small multi-turn coincident loop. Seismology and Geology (in Chinese), 32(1): 90-97, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2010.01.009.

Zhang Q X. 2021. Application of seismic interference imaging technology in shallow exploration [Master's thesis] (in Chinese). Xuzhou:

China University of Mining and Technology, doi: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001243.

Zhang S T, Zhang H, Yang H Y, *et al*. 2013. A comparative study of transient electromagnetic devices of small multi-turn loop. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 37(5): 843-847, doi: 10.11720/j.issn.1000-8918.2013.5.16.

附中文参考文献

陈兴海, 张平松, 江晓益, 等. 2014. 水库大坝渗漏地球物理检测技术方法及进展. 工程地球物理学报, 11(2): 160-165, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.02.006.

淳少恒, 王飞飞, 陈儒军, 等. 2025. 基于 SiC MOSFET 的浅层高分辨瞬变电磁发射机研制. 地球物理学进展, 40(1): 358-371, doi: 10.6038/pg2025II0069.

付志红, 赵俊丽, 周雒维, 等. 2008. WTEM 高速关断瞬变电磁探测系统. 仪器仪表学报, 29(5): 933-936, doi: 10.19650/j.cnki.cjsi.2008.05.007.

林君, 嵇艳鞠, 于生宝, 等. 2004. ATEM-Ⅱ型瞬变电磁系统的实际应用. 物探与化探, 28(6): 496-499.

刘玮. 2023. 瞬变电磁法在地球物理勘探中的应用研究. 能源与节能,(3): 219-221.

蒙超. 2017. 大回线瞬变电磁法浅层探测研究[硕士论文]. 北京: 煤炭科学研究总院.

彭良玉. 2016. 基于多匝小线圈的瞬变电磁发射系统设计[硕士论文]. 长春: 吉林大学.

王浩文. 2019. 瞬变电磁小回线探测技术研究[博士论文]. 重庆: 重庆大学, doi: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.001240.

王亮, 龙霞, 王婷婷, 等. 2022. 等值反磁通瞬变电磁法在城市浅层空洞探测中的应用. 物探与化探,46(5): 1289-1295, doi: 10.11720/wtyht.2022.1467.

许超, 殷昊, 陈儒军, 等. 2024. 收发一体式浅层瞬变电磁线圈及其缓冲电路研制. 地球物理学进展, 40(5): 2334-2347, doi: 10.6038/pg2025II0257.

徐正玉, 付志红, 廖先, 等. 2022. 基于小回线瞬变电磁法的病害体精细探测应用分析. 地球物理学进展, 37(2): 892-901, doi: 10.6038/pg2022FF0187.

薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展. 地球物理学进展, 22(4): 1195-1200.

杨海燕, 岳建华, 刘志新. 2006. 矿井瞬变电磁法多匝小回线装置电感效应的理论研究. 吉林大学学报(地球科学版), 36(S1): 168-171, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.2006.s1.038.

张华, 曹军, 孙海. 2010. 瞬变电磁法多匝重叠小回线装置实验研究. 地震地质, 32(1): 90-97, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2010.01.009.

章强新. 2021. 地震干涉成像技术在浅层勘探中的应用[硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学, doi: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001243.

张淑婷, 张华, 杨海燕, 等. 2013. 瞬变电磁法多匝小回线装置实验对比. 物探与化探, 37(5): 843-847, doi: 10.11720/j.issn.1000-8918.2013.5.16.