

文章编号:1674-2974(2016)10-0094-08

## 基于 FPGA+DSP 的浅地表频域 电磁探测数字处理系统\*

周逢道<sup>1,2</sup>, 韩思雨<sup>2</sup>, 綦振伟<sup>2</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>, 孙彩堂<sup>1,2†</sup>

(1. 吉林大学 国家地球物理探测仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130061;

2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:**针对浅地表频域电磁探测对接收信号采集、传输和现场高效处理的要求,提出基于 FPGA+DSP 的浅地表频域电磁探测数字处理系统. 在 FPGA 中实现数据采集、控制和传输 FIFO(First Input First Output)模块,采用新式通用并行端口 UPP(Universal Parallel Port)实现大数据传输,基于 TMS320C6748 平台,采用正交锁定放大方法,设计高效率数据处理算法,利用上位机软件通过 RJ45 网口对系统进行控制并显示结果. 实测结果表明:该架构数字处理系统,对不同金属有着较强探测能力,加快了数据传输速率,缩短了系统工作时间,提高了工作效率.

**关键词:**浅地表频域电磁探测;数字处理;FPGA+DSP;正交锁定放大

**中图分类号:**TH763

**文献标识码:**A

## Digital Processing System for Shallow Surface Frequency-domain Electromagnetic Detection Based on FPGA+DSP

ZHOU Feng-dao<sup>1,2</sup>, HAN Si-yu<sup>2</sup>, QI Zhen-wei<sup>2</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, SUN Cai-tang<sup>1,2†</sup>

(1. National Geophysical Exploration Engineering Research Center, Jilin Univ, Changchun, Jilin 130061, China;

2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin Univ, Changchun, Jilin 130061, China)

**Abstract:** To meet the requirements of acquisition, transport and spot efficient processing of the received signal in shallow surface frequency-domain electromagnetic detection, a digital processing system for shallow surface frequency-domain electromagnetic detection based on FPGA+DSP was proposed. Data acquisition, control, and transmission FIFO module were compiled in FPGA. New universal parallel port UPP was used to achieve high data transfer. Efficient data processing algorithm was written with orthogonal lock-in amplification method based on TMS320C6748. The system was controlled and the results were displayed with PC software through the RJ45 network port. Test results have shown that the digital processing system of the proposed architecture for different metals has a strong ability of discovery. Data transmission rate is accelerated, system working time is shortened and work efficiency is improved.

**Key words:** shallow surface frequency-domain electromagnetic detection; digital processing; FPGA+DSP; orthogonal lock-in amplification

\* 收稿日期:2016-03-15

基金项目:国家潜在油气资源产学研用合作创新研究项目(OSR-02);吉林省科技厅发展计划重点项目(20100349)

作者简介:周逢道(1970-),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: sunct@jlu.edu.cn

浅地表频域电磁探测是通过发射线圈向地下发射不同频率电磁波建立一次场,接收线圈采集地下异常体激发产生的二次场,获得地下介质电磁特性的一种方法,是解决城市施工建设,工程地质调查,军事探测中常常出现误破坏和安全隐患的重要手段。为了提高探测效率,探测平台往往需要快速移动并设置多通道接收大量数据,要求数字处理系统能够采集有效数字信息,快速传输数据并现场高效处理,对经过区域的地下介质电磁特性进行初步判断和显示<sup>[1-6]</sup>。因此,数字处理系统是浅地表频域电磁探测仪器的核心技术之一,其硬件结构和处理算法将直接影响整个仪器系统的效率和性能。所以,研究一种高效的浅地表频域电磁探测数字处理系统具有很大的研究意义。

现在国外比较著名的产品有美国 Geophex 公司的 GEM 系列频域电磁探测仪,其数字处理系统架构为分离式结构,探测数据需要存储在机器上,探测完成后传到计算机进行处理显示,不适用于要求实时处理显示的场合<sup>[4-8]</sup>。而国内浅地表的电磁探测领域尚处于研究初期,吉林大学研制了一款宽频电磁探测设备,其数字处理系统架构为 FPGA (Field-Programmable Gate Array)+单片机,上位机负责数据处理和结果显示,上位机实时处理数据占用大量 CPU 资源,效率不高,亟待改善<sup>[7]</sup>。

为了实现浅地表频域电磁探测接收信号的采集、快速传输和现场高效处理,缩短系统工作时间,本文提出了基于 FPGA+DSP 的浅地表频域电磁探测数字处理系统设计方案,通过设计 FPGA 采集传输方案、DSP 高效率数据处理方案和友好交互的上位机控制软件来实现系统功能。

## 1 总体设计

图 1 所示为系统的整体框图。本数字处理系统由 FPGA 采集传输单元、DSP 数据处理单元和上位机控制显示单元 3 部分组成。FPGA 内部发射控制模块产生数字驱动信号驱动发射电路在发射线圈中建立一次场,地下目标体产生涡流反射二次场,接收线圈与其耦合产生接收系统输入信号。通过 FPGA 采集传输单元控制模拟电路 5 个通道采集输入信号的数字量,采用新一代大数据传输总线 UPP 快速传输数据,再经过 DSP 数据处理单元进行算法处理,上位机通过 RJ45 网络接口进行采集控制和有效信息显示,RS232 串口作为调试和备用数据通道。

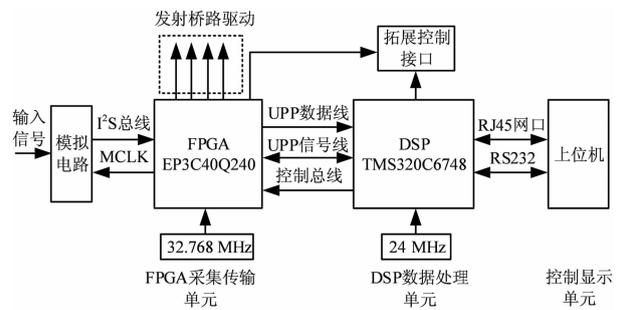


图 1 系统整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of the system

## 2 FPGA 采集传输单元设计

### 2.1 FPGA 内部模块设计

本设计 FPGA 硬件平台采用 ALTERA 公司的 EP3C40Q240 系列,它具有大量的逻辑单元,可反复擦写,实时校正,在逻辑时序编程方面具有很大的灵活性<sup>[9]</sup>。如图 2 所示,使用 VHDL 语言和原理图相结合的方式在 QuartusII 软件中构建 FPGA 内部数据转换模块、同步协调模块、发射控制模块、译码电路模块和 FIFO 模块。A 为数据转换结束标志,B 和 C 为同步信号,D 为控制采集信号。

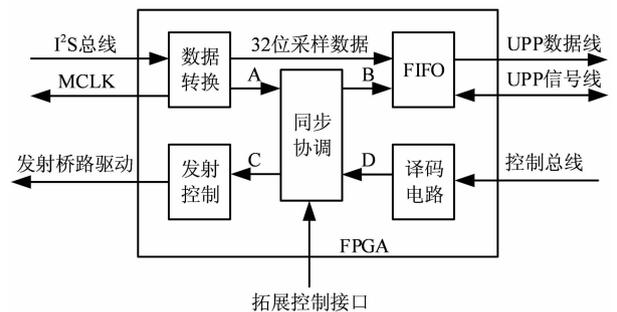


图 2 FPGA 内部设计框图

Fig. 2 Diagram of interior design in FPGA

数据转换模块通过 I²S (Inter-IC Sound) 总线和 MCLK 将模拟电路中 ADC 转换的数字信号进行提取,把串行数据转换为并行的 32 位数据,并提供给 FIFO 模块,同时产生转换结束信号给同步协调模块。MCLK 为 FPGA 主时钟经过倍频和分频得到的 ADC 采样频率控制信号,当采样率为 384 kHz 时,MCLK 为 49.125 MHz。I²S 总线为飞利浦公司制定的一种专门用于数字音频视频信号传输的总线标准,由 3 条信号线组成:帧时钟信号线 LRCK、位时钟信号线 BCLK 和数据输出信号线 SDATA。在 MCLK 的驱动下,当 LRCK 为高电平时,ADC 输出左通道数据,为低电平时,ADC 输出右通道数据;当 BCLK 为上升沿时,32 位采样数据

就会按照从高位到低位顺序逐位出现在 SDATA 上, 供 FPGA 读取<sup>[7]</sup>.

在浅地表频域电磁探测中, 采集信号的相位信息是采集结果中非常重要的信息, 发射系统和接收系统需要在操作者发出采集指令后同一时刻开始工作, 因此具备同步功能的同步协调模块至关重要. 当数据转换结束标志和控制采集信号都使能时, 同步信号使能发射和 FIFO 同时进行工作. 在需要几套系统同时工作时, 可指定一套系统为主系统, 其他系统为从系统, 主系统的 DSP 通过拓展控制接口控制从系统的 FPGA 同步协调模块来使所有系统同步工作<sup>[7-8]</sup>.

发射控制模块根据设定的频率, 在同步信号使能情况下输出对应频率方波信号, 驱动发射系统中的桥路工作. 译码电路模块的输入为来自 DSP 的 8 根控制信号总线, 模块负责对不同控制编码进行译码, 来实现上位机的具体功能.

## 2.2 大数据传输设计

浅地表频域电磁探测仪器在很多应用场合下需要进行实时数据处理, 并得到初步结果供现场判定. 本设计中, AD 的采样频率很高, 再加上多通道采集, 使得数据传输速率很大, 如式(1)所示:

$$Q = f_s \times \frac{\text{bits}}{8} \times \text{ch} = 384\text{k} \times \frac{32}{8} \times 5 \approx 8 \text{ MB/s.} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为每秒数据流量;  $f_s$  为 AD 采样率; bits 为 AD 的位数; ch 为通道个数. 由式(1)可知数据传输速率很大, 一般的串口传输无法达到该速率.

所以本系统需要设计大数据传输方案, FPGA 与 DSP 的大数据传输有常用的 EMIFA 即外部存储器接口, 也有最近几年 TI 才推出的 UPP 即通用并行接口. EMIFA 有地址线和数据线, 片选信号, 读写使能信号; 而 UPP 只有两个数据通道, 没有地址线的概念, 是通过 START/ENABLE/WAIT/CLOCK 信号控制数据的传输和同步. 所以, 一般使用 UPP 都是在 FPGA 里生成一个 FIFO, DSP 通过 UPP 接口连续的读取 FIFO 里的数据, 而不像 EMIFA 那样, FPGA 中需要建立多个状态寄存器和存储器, 先要发送地址信号然后读取或写入数据. 所以 UPP 的通讯速率要比 EMIFA 高很多. 当 DSP 的 CPU 频率为 456 MHz 时, UPP 时钟可以达到 114 MHz, 使用上升沿和下降沿均锁存数据的话传输速率可以达到 228 MB/s, 而 EMIFA 的时钟最高为 148 MHz<sup>[10]</sup>. 基于以上分析, 本设计采用 UPP 作

为大数据传输方式, 如图 3 所示, 包括 FPGA 内部 FIFO 模块和 UPP 模块两部分.

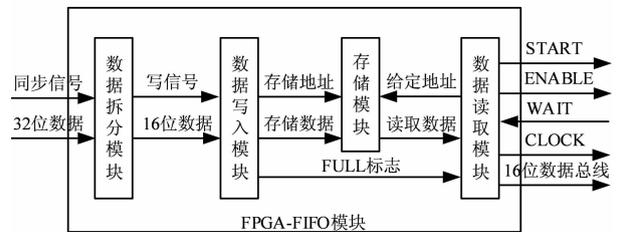


图 3 大数据传输设计框图  
Fig. 3 Big data design diagram

FIFO 模块即先入先出队列, 包括数据拆分模块、数据写入模块、存储模块和数据读取模块. 由于 UPP 数据总线为 16 位, 所以数据拆分模块负责在同步信号使能下, 将 32 位采集数据拆分为高 16 位和低 16 位以方便传输, 并给定每个 16 位数据包的写信号; 数据写入模块采用状态机的方式在数据写信号上升沿到来时, 读取 16 位数据, 并按照给定数据存储地址写入存储模块中, 当数据存储满时给读取模块 FULL 标志; 存储模块利用 QuartusII 中 MegaWizard Plug-In Manager 提供的双口 RAM 宏模块完成, 存储整周期 5 个通道数据, RAM 的位宽为 16 位, RAM 总大小为 32 kB; 数据读取模块同样采用状态机方式在接收到 FULL 标志后, 给定存储器数据地址, 读取整个存储器的数据送到 16 位 UPP 数据总线并产生 UPP 控制信号 START, ENABLE, CLOCK, DSP 接收模式下单倍数据率的 UPP 通道信号时序如图 4 所示.

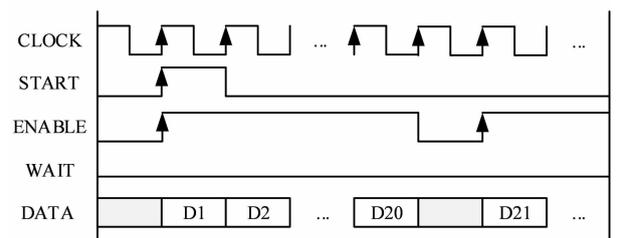


图 4 DSP 接收模式下单倍数据率 UPP 通道信号时序图

Fig. 4 Channel signal timing diagram of single data rate UPP in DSP receive mode

## 3 DSP 高效数据处理单元设计

本设计 DSP 平台采用美国德州仪器(TI)公司最新推出的 TMS320C6748, 它是具有众多连接选项与浮点功能的全新高性能处理器, 也是业界功耗

最低的浮点数字信号处理器为 420 mW,可充分满足高效、连通性设计对高集成度外设、更低热量耗散以及更长电池使用寿命的需求<sup>[11]</sup>.为达到硬件最快处理速度,本设计 DSP 的 CPU 工作频率为 456 MHz,采用 C 语言在 CCS 软件中编写数据处理算法.

图 5 所示为 DSP 数据处理软件流程图,通过 RJ45 网口接收上位机控制指令,分为两种指令模式:标定模式和正式采集模式.标定模式又分为通道相位标定模式、背景场标定模式和土壤相位标定模式.本数据处理算法基于正交锁定放大方法,它是频率域电磁法中重要的频率信息提取方法,其原理是:已知发射频率,所以二次场的主要频率成分已知,使用同频率的正交参考信号对二次场信号进行  $I, Q$  分量的提取来获得异常体频率特性<sup>[12]</sup>.

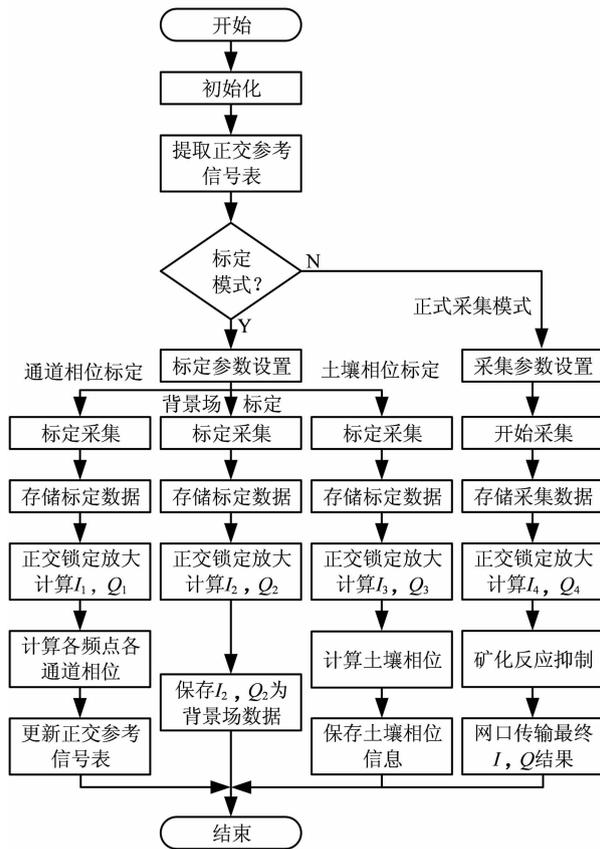


图 5 DSP 数据处理软件流程图  
Fig. 5 Flow diagram of DSP data processing software

FPGA 控制发射电路向发射线圈发送方波激励信号  $v_T$ ,其傅里叶展开式如式(2)所示:

$$v_T = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4A}{k\pi} \sin(k2\pi ft). \quad (2)$$

式中:  $4A/k\pi$  为第  $k$  次谐波幅值;  $f$  为发射频率.

地下异常体感应产生的二次场信号在接收端的感应电压为  $v_R$ ,如式(3)所示:

$$v_R = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} a_{Rk} \sin(k2\pi ft + \theta_{Rk}). \quad (3)$$

式中:  $a_{Rk}$  为第  $k$  次频率成分对应的幅度;  $\theta_{Rk}$  为相对于发射波形第  $k$  次频率成分的相移.

尽管 DSP 在浮点数乘加运算上速度很快,但是大量三角函数的运算依然会占用大量时间,并且本设计中多次用到相同的正交参考信号,所以提出在 DSP 中提前构建正弦波正交参考信号表,包括同相分量  $v_I$  和正交分量  $v_Q$ ,在正式采集过程中明显提高了系统运行速度,第  $i$  个离散值点如式(4),式(5)所示:

$$v_I(i) = a_{IQ} \sin(2\pi f \times i \times t_c + \varphi), \quad (4)$$

$$v_Q(i) = a_{IQ} \cos(2\pi f \times i \times t_c + \varphi). \quad (5)$$

式中  $a_{IQ}$  为  $v_I$  和  $v_Q$  参考信号的幅度;  $i$  为每一个正弦离散值点;  $t_c$  为 ADC 的采样时间间隔;  $\varphi$  为对应频率的通道相位.

感应电压  $v_R$  经过 ADC 的模数转换后,模拟量被数字离散化为  $v_R'$ ,与参考信号对应每个离散值点相乘,如式(6),式(7)所示:

$$I(i) = v_R'(i)v_I(i) = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} a_{Rk} \sin(k2\pi f \times i \times t_c + \theta_{Rk}) a_{IQ} \sin(2\pi f \times i \times t_c + \varphi) = -\frac{a_{R1} a_{IQ}}{2} [\cos(4\pi f \times i \times t_c + \theta_{R1} + \varphi) - \cos(\theta_{R1} - \varphi)]. \quad (6)$$

$$Q(i) = v_R'(i)v_Q(i) = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} a_{Rk} \sin(k2\pi f \times i \times t_c + \theta_{Rk}) a_{IQ} \cos(2\pi f \times i \times t_c + \varphi) = \frac{a_{R1} a_{IQ}}{2} [\sin(4\pi f \times i \times t_c + \theta_{R1} + \varphi) + \sin(\theta_{R1} - \varphi)]. \quad (7)$$

经过构造的 LPF(低通滤波器)函数保留直流分量,所有离散点的乘积做和求平均即为所求的  $I, Q$  幅值<sup>[12]</sup>.因为从二次场信号产生经过模拟电路再到 DSP 引起了二次场相位延迟和模拟通道相位延迟  $\theta$ ,所以需要通过通道相位标定模式,使参考信号表中通道相位  $\varphi$  为 0,经正交锁定放大得到  $I_1, Q_1$ ,通过式(8)即可得到  $\theta$ .得到通道相位后,令  $\varphi = \theta$  更

新参考信号表,在背景场标定模式中计算得到没有相位延迟的纯净背景场  $I_2, Q_2$ .

$$\theta = \arctan \left( \frac{Q_1}{I_1} \right). \quad (8)$$

由于探测系统工作时探测线圈贴近地表,土壤中矿物质也会感生二次场,这种效应被称为矿化反应.在正常工作时常常会在没有异常体出现时造成探测数据的假象,所以必须进行抑制.需要取样探测区域土壤样本进行标定,在土壤相位标定模式中,计算得到  $I_3, Q_3$ ,按照式(9)求取土壤相位  $\alpha$ .

$$\alpha = \arctan \left( \frac{Q_3 - Q_2}{I_3 - I_2} \right). \quad (9)$$

矿化反应抑制的原理如图6所示,通过坐标旋转的方法对矿化反应进行抑制.在正式采集模式中,将经过正交锁定放大得到的  $I_4, Q_4$  经过式(10),式(11)完成坐标旋转得到最终的结果  $I, Q$  并通过RJ45网口传送给上位机.

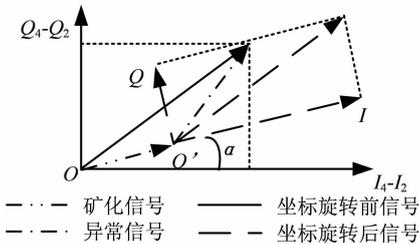


图6 矿化反应抑制原理图  
Fig.6 Schematic diagram of mineralization response inhibition

$$I = (I_4 - I_2) \cos \alpha + (Q_4 - Q_2) \sin \alpha, \quad (10)$$

$$Q = -(I_4 - I_2) \sin \alpha + (Q_4 - Q_2) \cos \alpha. \quad (11)$$

#### 4 上位机控制显示单元设计

本系统的上位机控制显示单元软件采用C++语言在Microsoft Visual Studio 2010软件中通过MFC编写实现<sup>[13-14]</sup>,图7所示为上位机软件流程图.控制功能主要包括检测设置、标定模式和正式采集模式3个功能.检测设置功能包括检测网络接口、标定参数设置和采集参数设置;标定模式功能包括通道相位标定、背景场标定和土壤相位标定;正式采集模式包括开始采集和停止采集.显示功能通过OCX绘图软件 TeeChart 实时描绘  $I, Q$  曲线图.

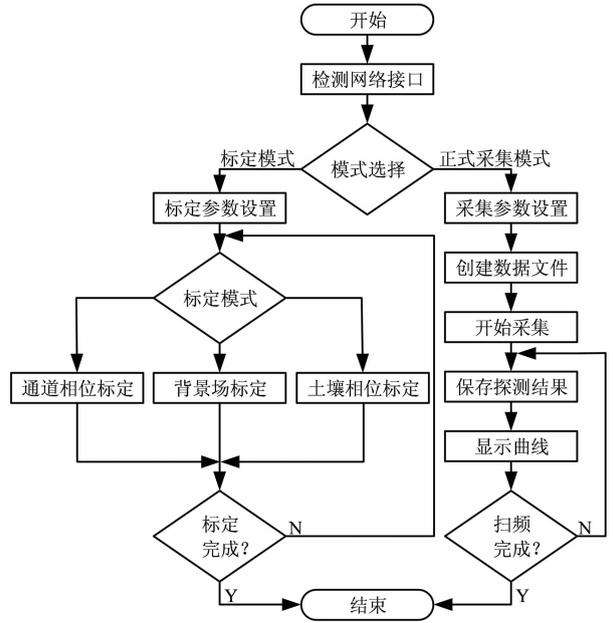


图7 上位机软件流程图  
Fig.7 Diagram of PC software flow

#### 5 实验结果

##### 5.1 金属异常反应测试

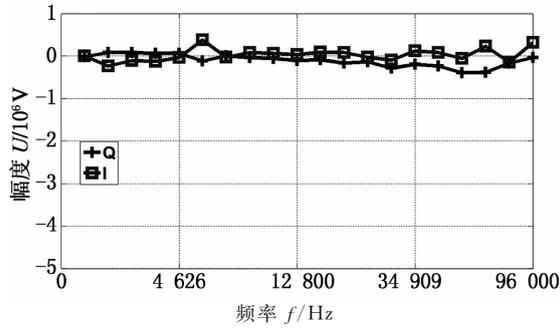
本系统主要是针对吉林大学研制的宽频电磁探测设备数字处理系统(以下称原系统)存在的数据传输速度较慢、上位机实时处理数据占用大量CPU资源,效率不高等缺点进行的升级优化<sup>[15-17]</sup>.

在吉林大学野外环境测试室模拟野外探测环境进行金属异常反应测试,用原系统和本系统分别测试无金属异常体情况和几种质量为0.2g的生活常见金属样品:易拉罐拉环、1角硬币和铜箔,金属掩埋于沙土下1cm,探测线圈距离地表5cm,测试频点为2~96kHz共20个频点,图8(a)~(h)为探测结果的  $I, Q$  曲线<sup>[18-20]</sup>.

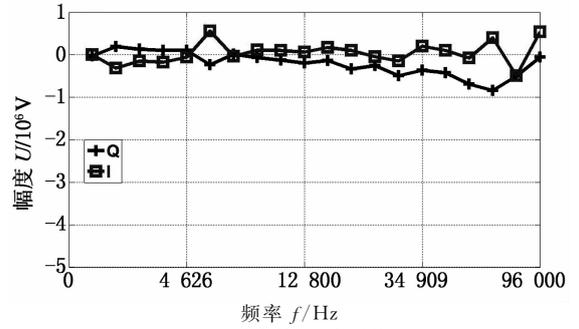
从图8结果可以对比出,不同金属样品频率曲线差异明显,本系统比原系统曲线幅度更大,对不同金属异常体有着较强的发现能力,为后续的辨识工作打下了坚实基础.

##### 5.2 金属探测灵敏度测试

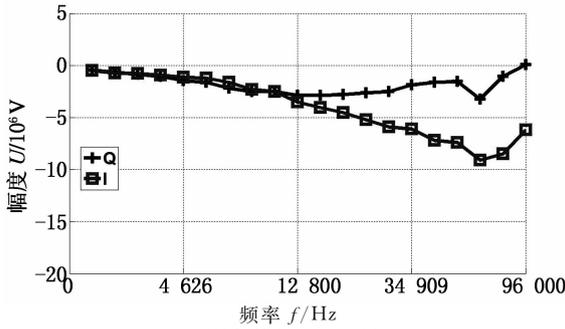
用原系统和本系统对常见的钢珠进行灵敏度实验,均掩埋于沙土下1cm,探测距离为探测线圈距离地表距离.测试结果如表1所示.由表1可知,本系统比原系统探得率有所提高,当探测距离一定时,金属样品质量越大,探测效果越好,探得率越高;当金属样品质量一定时,探测距离越小,探测效果越好,探得率越高.



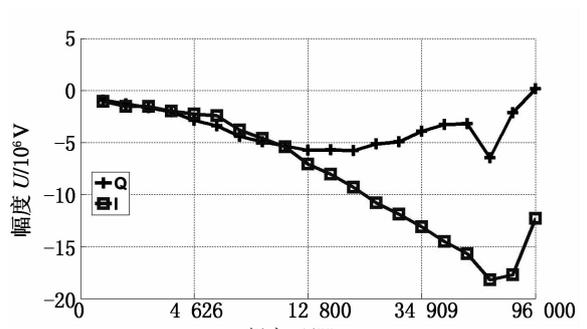
(a) 无异常情况(原系统)



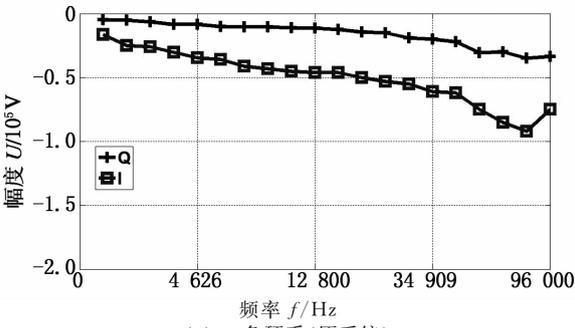
(b) 无异常情况(本系统)



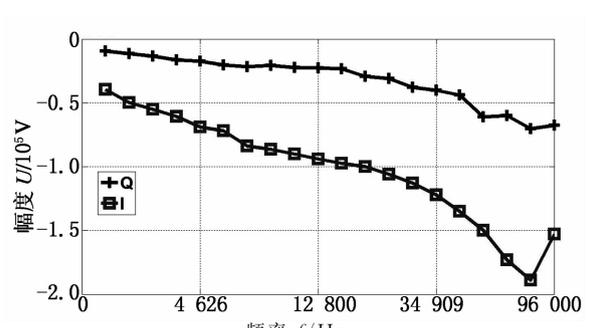
(c) 易拉罐拉环(原系统)



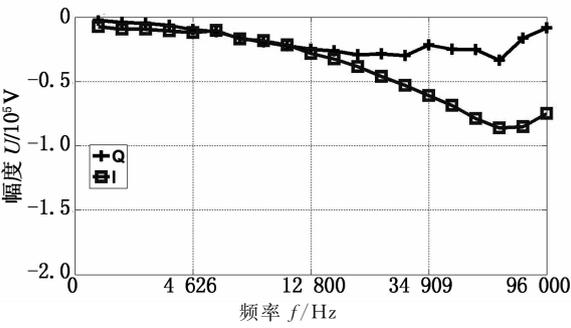
(d) 易拉罐拉环(本系统)



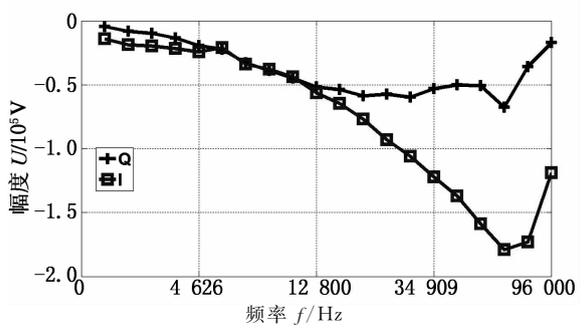
(e) 一角硬币(原系统)



(f) 一角硬币(本系统)



(g) 铜箔(原系统)



(h) 铜箔(本系统)

图 8 无异常情况和几种生活常见金属  $I, Q$  分量曲线图(原系统和本系统)  
Fig. 8  $I, Q$  components diagram of no exceptions and several living common metals(the original system and this system)

表1 金属探测灵敏度测试统计表  
Tab.1 Testing statistics of metal detector sensitivity

金属样品	探测距离/cm	测试数/次	原系统探得数/次	本系统探得数/次	原系统探得率/%	本系统探得率/%
0.1 g 钢珠	5	50	42	44	84	88
0.5 g 钢珠	5	50	46	47	92	94
1 g 钢珠	5	50	49	49	98	98
1 g 钢珠	7	50	42	43	84	86
1 g 钢珠	9	50	35	38	70	76

### 5.3 系统主要优化特性对比

本系统相比于原系统的主要优化特性对比如表2所示.原系统的数据传输速度为FPGA经单片机向上位机的传输速度,本系统的数据传输速度为FPGA向DSP的传输速度,处理时间为开始采集到结果显示的时间,包括信号采集、传输和处理的时间.

表2 系统主要优化特性对比  
Tab.2 Comparison of instruments key optimization features

设备名称	下位机架构	数据处理方式	数据传输速度/(MB·s <sup>-1</sup> )	5个通道3个频点处理时间/ms
原系统	FPGA+单片机	上位机	12	80
本系统	FPGA+DSP	DSP	114	25

由表2可知,本设计提出的基于FPGA+DSP的浅地表频域电磁探测数字处理系统,数据传输速率提高了9.5倍,数据处理时间缩短了68.75%.

## 6 结论

1)在浅地表频域电磁探测数字处理系统中采用FPGA+DSP架构,与原有FPGA+单片机架构相比,数据处理平台由上位机改为DSP,减轻了上位机CPU负担,系统工作时间缩短了68.75%,便于现场高效应用.

2)FPGA与DSP间采用新一代大数据传输总线UPP,其数据传输速率比原有单片机的传输方式提高了9.5倍.

3)基于正交锁定放大技术的数据处理算法对采集信息进行了有效的处理并提取对应的I、Q分量.

实验证明应用于新架构的算法对不同金属有着较强的发现能力,对一定范围内不同质量和探测深度的金属异常体探得率较高,可用于一定深度金属异常体的浅地表电磁探测.

## 参考文献

- [1] 刘奇元,于德介,王翠亭,等.基于DSP的磨削表面粗糙度在线监测系统开发[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(8):1-7.  
LIU Qi-yuan, YU De-jie, WANG Cui-ting, et al. Development of the online measuring system of grinding surface roughness based on DSP[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(8): 1-7. (In Chinese)
- [2] 张文秀,林君,刘立超,等.分布式电磁探测宽频数据采集系统设计及实现[J].吉林大学学报:工学版,2012,42(6):1426-1431.  
ZHANG Wen-xiu, LIN Jun, LIU Li-chao, et al. Design and implementation of broadband data acquisition system for distributed electromagnetic exploration [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(6): 1426-1431. (In Chinese)
- [3] GRIMM R E. Low-frequency electromagnetic methods for planetary subsurface exploration[C]//2013 IEEE Aerospace Conference, AERO2013. Big Sky, Montana United States: IEEE Computer Society, 2013: 1-9.
- [4] WANG Shi-bin, CHEN Xue-feng, WANG Yan, et al. Nonlinear squeezing time-frequency transform for weak signal detection [J]. Signal Processing, 2015, 113(8): 195-210.
- [5] 张赫.宽频带低频连续波电磁仪器的研制[D].长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院,2012:1-5.  
ZHANG He. Development of broadband low-frequency continuous-wave electromagnetic method instruments [D]. Changchun: College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, 2012: 1-5. (In Chinese)
- [6] SVATOS J, VEDRAL J, FEXA P. Metal detector excited by frequency-swept signal [J]. Metrology and Measurement Systems, 2011, 18(1): 57-67.

- [7] 丁凯来. 浅地表电磁探测系统关键技术研究[D]. 长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院, 2015:17-23.  
DING Kai-lai. Research on key techniques of shallow surface electromagnetic detection system [D]. Changchun: College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, 2015:17-23. (In Chinese)
- [8] 刘立超. 网络化可控源音频大地电磁法接收系统关键技术研究[D]. 长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院, 2014:17-26.  
LIU Li-chao. Research on key techniques of networked receiver for controlled source audio-frequency magnetotelluric method [D]. Changchun: College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, 2014:17-26. (In Chinese)
- [9] 陈欣波, 陈欣, 陈智敏, 等. Altera FPGA 工程师成长手册[M]. 北京:清华大学出版社, 2012:106-148.  
CHEN Xin-bo, CHEN Xin, CHEN Zhi-min, *et al.* Growing manual of Altera FPGA engineer [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012:106-148. (In Chinese)
- [10] SHUBITIDZE F, FERNANDEZ J P, BARROWES B E, *et al.* The orthonormalized volume magnetic source model for discrimination of unexploded ordnance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, (52)8: 4658-4670.
- [11] 董言治, 娄树理, 刘松涛. TMS320C6000 系列 DSP 系统结构原理与应用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2014:1-20.  
DONG Yan-zhi, LOU Shu-li, LIU Song-tao. Structural principle and application guide of TMS320C6000 DSP [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014:1-20. (In Chinese)
- [12] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2011:171-214.  
GAO Jin-zhan. Weak signal detection [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 171-214. (In Chinese)
- [13] 仇谷峰, 张京, 曹黎明. 基于 Visual C++ 的 MFC 编程[M]. 北京:清华大学出版社, 2015:85-115.  
QIU Gu-feng, ZHANG Jing, CAO Li-ming. MFC programming based on visual C++ [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015:85-115. (In Chinese)
- [14] 谭浩强. C 程序设计[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社, 2010:37-82.  
TAN Hao-qiang. C programming [M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2010:37-82. (In Chinese)
- [15] 周逢道, 王金玉, 唐红忠, 等. 近地表电磁探测多频数字驱动信号产生技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(3): 682-687.  
ZHOU Feng-dao, WANG Jin-yu, TANG Hong-zhong, *et al.* Multi-frequency digital drive signal generation technology in near surface electromagnetic detection domain [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(3): 682-687. (In Chinese)
- [16] SVATOS J, VEDRAL J, FEXA P. Metal detector excited by frequency-swept signal[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2011, 18(1): 57-67.
- [17] 陈健. 宽频带时频电磁接收机关键技术研究[D]. 长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院, 2012:1-20.  
CHEN Jian. Research on key techniques of broadband time-frequency electromagnetic receiver [D]. Changchun: College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, 2012:1-20. (In Chinese)
- [18] WANG Jie, YANG Lu, GAO Long, *et al.* Current progress on weak signal detection[C]//Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). Chengdu, China: IEEE Computer Society, 2013: 1812-1818.
- [19] ABBIE T, WATNI K, PAUL S L. Weak-signal iterative holography [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10):2615-2619.
- [20] SHEVLYAKOV G, SHIN V, EE S, *et al.* Asymptotically stable detection of a weak signal[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2014, 28(9): 848-858.