



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109633759 B

(45)授权公告日 2020.02.07

(21)申请号 201811516744.3

审查员 袁东驹

(22)申请日 2018.12.12

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109633759 A

(43)申请公布日 2019.04.16

(73)专利权人 吉林大学

地址 130012 吉林省长春市朝阳区前进大街2699号

(72)发明人 张洋 张博 皮帅 陈思博

孙德立 李苏杭 林婷婷

(74)专利代理机构 沈阳铭扬联创知识产权代理

事务所(普通合伙) 21241

代理人 屈芳

(51)Int.Cl.

G01V 3/14(2006.01)

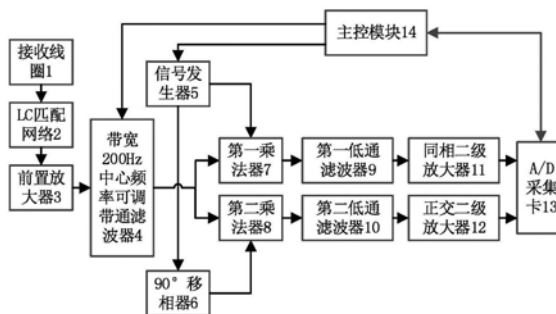
权利要求书3页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法

(57)摘要

本发明涉及核磁共振地下水探测技术领域,具体地来讲为一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法,包括:接收线圈,感应地下水产生的磁共振信号;带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,通过主控模块调节中心频率为拉莫尔频率,并接收磁共振信号;主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬迁;主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相器转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬迁;可实现快速提取。



1. 一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置,其特征在于,该装置包括:接收线圈、带宽200Hz中心频率可调带通滤波器、信号发生器、90°移相器、同相通道、正交通道以及主控模块;

所述接收线圈,感应地下水产生的磁共振信号;

所述带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,通过主控模块调节中心频率为拉莫尔频率,并接收磁共振信号;

所述主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬迁;

所述主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相器转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬迁;

所述主控模块采集同相通道和正交通道的信号,提取地面磁共振信号;

提取地面磁共振信号包括:同相通道的原始数据公式表示为

$$u_o(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t) - \exp(-\omega_c t)] \quad (1)$$

其中, T_2^* 为平均弛豫时间, ω_c 为截止角频率,

当采集时间大于10ms时, $\exp(-t/T_2^*) \gg \exp(-\omega_c t)$, 采集的同相通道的原始数据公式简化为

$$f(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t)] \quad (2)$$

对上式求对数,得到直线方程

$$I(t) = \ln[f(t)] = -\frac{1}{T_2^*}t + \ln[\frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)}] \quad (3)$$

通过直线方程斜率k求取 $T_2^* = -1/k$, 再通过直线方程的纵截距I(0)获得二元一次方程:

$$\frac{\exp[I(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = 0.5E_0 \cos(\theta) \quad (4)$$

同理,得到的正交通道的一个二元一次方程:

$$\frac{\exp[Q(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = -0.5E_0 \sin(\theta) \quad (5)$$

Q(0) 是正交通道求对数后的直线方程的纵截距,联立公式(4)和(5)建立方程组,求取初始振幅 E_0 和相位 θ 。

2. 按照权利要求1所述的装置,其特征在于,该装置还包括:LC匹配网络以及前置放大器,所述LC匹配网络接收接收线圈的磁共振信号,实现谐振以提高信号幅度,并压制噪声干扰;

所述前置放大器对经由LC匹配网络信号进行第一次放大,并把放大后的信号传递到带宽200Hz中心频率可调带通滤波器。

3. 按照权利要求1所述的装置,其特征在于,所述同相通道包括第一乘法器和第一低通

滤波器组成正交矢量型锁相放大器以及同相二级放大器,接收带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,同时与所述信号发生器连接,拉莫尔频率的余弦信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过第一乘法器实现频率搬迁,再经过第一低通滤波器消除高频分量和大部分噪声,通过所述同相二级放大器进一步放大。

4.按照权利要求1所述的装置,其特征在于,所述正交通道包括第二乘法器和第二低通滤波器组成正交矢量型锁相放大器以及正交二级放大器,具有拉莫尔频率的余弦信号,经过90°移相器转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过第二乘法器实现频率搬迁,再经过第二低通滤波器消除高频分量和大部分噪声,通过正交二级放大器进一步放大。

5.按照权利要求1所述的装置,其特征在于,所述装置还包括A/D采集卡,所述主控模块控制A/D采集卡获取同相通道的信号,采集到同相通道的原始数据;控制A/D采集卡获取通道的信号,采集到正交通道的原始数据。

6.按照权利要求3所述的装置,其特征在于,所述第一低通滤波器采用截止频率为20Hz的一阶低通滤波器。

7.按照权利要求4所述的装置,其特征在于,所述第二低通滤波器均采用截止频率为20Hz的一阶低通滤波器。

8.一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取方法,其特征在于,所述方法包括:

通过接收线圈感应地下水产生的磁共振信号;

磁共振信号经由带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,所述中心频率为拉莫尔频率;

产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬迁;

产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬迁;

采集同相通道和正交通道的信号,提取地面磁共振信号;

同相通道的原始数据公式表示为

$$u_o(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t) - \exp(-\omega_c t)] \quad (1)$$

其中, T_2^* 为平均弛豫时间, ω_c 为截止角频率,

当采集时间大于10ms时, $\exp(-t/T_2^*) \gg \exp(-\omega_c t)$,采集的同相通道的原始数据公式化简为

$$f(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t)] \quad (2)$$

对上式求对数,得到直线方程

$$I(t) = \ln[f(t)] = -\frac{1}{T_2^*}t + \ln[\frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)}] \quad (3)$$

通过直线方程斜率k求取 $T_2^* = -1/k$,再通过直线方程的纵截距I(0)获得二元一次方程:

$$\frac{\exp[I(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = 0.5E_0 \cos(\theta) \quad (4)$$

同理,得到的正交通道的一个二元一次方程:

$$\frac{\exp[Q(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = -0.5E_0 \sin(\theta) \quad (5)$$

Q(0)是正交通道求对数后的直线方程的纵截距,联立公式(4)和(5)建立方程组,求取初始振幅 E_0 和相位 θ 。

基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及核磁共振地下水探测技术领域,具体地来讲为一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法。

背景技术

[0002] 地面磁共振技术能够直接探测地下水,且具有定性定量探测的优点。然而地面磁共振信号极其微弱,只有纳伏级,易受噪声干扰,信噪比较低。尤其是在人为噪声干扰严重的区域,会出现放大器饱和、无法提取出有效信号的问题。

[0003] CN102053280A公开的“带有参考线圈的核磁共振地下水探测系统及探测方法”,但该方法只能消除具有相关性的工频谐波噪声,而且消噪效果受两个线圈的结构、铺设位置和噪声突变性影响很大。

[0004] CN104614778A公开的“一种基于ICA的核磁共振地下水探测信号噪声消除方法”,该方法利用ICA算法削弱随机噪声。但在实际噪声环境中,难以实现对有色噪声的可靠压制。

[0005] CN108254794A公开的“一种基于建模反恢复技术的磁共振消噪方法”,该方法利用极窄的低通滤波压制噪声,通过后期拉普拉斯和求导变换恢复原始信号。但由于该方法在软件上实现,无法抑制采集装置放大器饱和的问题,且数据运算复杂难以在片上嵌入式系统实现信号的快速提取。

[0006] 目前,传统检测核磁共振信号的消噪算法多是针对单一噪声进行消噪处理,无法有效应对实际工作的复杂环境噪声。另外,上述三种方法都无法抑制采集装置放大器饱和的问题,且都是后续软件消噪,无法实时现场提取信号。因此,研究具有抗饱和功能,又能在野外工作现场快速提取出地面磁共振信号的新技术具有重要意义。

发明内容

[0007] 本发明所要解决的技术问题在于一方面提供一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置,另一方面提供一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取方法。

[0008] 本发明是这样实现的,一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置,该装置包括:接收线圈、带宽200Hz中心频率可调带通滤波器、信号发生器、90°移相器、同相通道、正交通道以及主控模块;

[0009] 所述接收线圈,感应地下水产生的磁共振信号;

[0010] 所述带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,通过主控模块调节中心频率为拉莫尔频率,并接收磁共振信号;

[0011] 所述主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬迁;

[0012] 所述主控模块控制信号发生器产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°

移相器转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬迁;

[0013] 所述主控模块采集同相通道和正交通道的信号,提取地面磁共振信号。

[0014] 进一步地,还包括:LC匹配网络以及前置放大器,所述LC匹配网络接收接收线圈的磁共振信号,实现谐振以提高信号幅度,并压制噪声干扰;

[0015] 所述前置放大器对经由LC匹配网络信号进行第一次放大,并把放大后的信号传递到带宽200Hz中心频率可调带通滤波器。

[0016] 进一步地,所述同相通道包括第一乘法器和第一低通滤波器组成正交矢量型锁相放大器以及同相二级放大器,接收带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,同时与所述信号发生器连接,拉莫尔频率的余弦信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过第一乘法器实现频率搬迁,再经过第一低通滤波器消除高频分量和大部分噪声,通过所述同相二级放大器进一步放大。

[0017] 进一步地,所述正交通道包括第二乘法器和第二低通滤波器组成正交矢量型锁相放大器以及正交二级放大器,具有拉莫尔频率的余弦信号,经过90°移相器转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过第二乘法器实现频率搬迁,再经过第二低通滤波器消除高频分量和大部分噪声,通过正交二级放大器进一步放大。

[0018] 进一步地,还包括A/D采集卡,所述主控模块控制A/D采集卡获取同相通道的信号,采集到同相通道的原始数据;控制A/D采集卡获取通道的信号,采集到正交通道的原始数据。

[0019] 进一步地,所述第一低通滤波器和所述第二低通滤波器均采用截止频率为20Hz的一阶低通滤波器。

[0020] 进一步地,所述第二低通滤波器均采用截止频率为20Hz的一阶低通滤波器。

[0021] 一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取方法,所述方法包括:

[0022] 通过接收线圈感应地下水产生的磁共振信号;

[0023] 磁共振信号经由带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,所述中心频率为拉莫尔频率;

[0024] 产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬迁;

[0025] 产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬迁;

[0026] 采集同相通道和正交通道的信号,提取地面磁共振信号。

[0027] 进一步地,同相通道的原始数据公式表示为

$$[0028] \quad u_o(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t) - \exp(-\omega_c t)] \quad (1)$$

[0029] 当采集时间大于10ms时, $\exp(-t/T_2^*) \gg \exp(-\omega_c t)$,采集的同相通道的原始数据公式化简为

$$[0030] \quad f(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t)] \quad (2)$$

[0031] 对上式求对数,得到直线方程

$$[0032] \quad I(t) = \ln[f(t)] = -\frac{1}{T_2^*}t + \ln[\frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)}] \quad (3)$$

[0033] 通过直线方程斜率k求取 $T_2^* = -1/k$,再通过直线方程的纵截距I(0)获得二元一次方程:

$$[0034] \quad \frac{\exp[I(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = 0.5E_0 \cos(\theta) \quad (4)$$

[0035] 同理,得到的正交通道的一个二元一次方程:

$$[0036] \quad \frac{\exp[Q(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = -0.5E_0 \sin(\theta) \quad (5)$$

[0037] Q(0)是正交通道求对数后的直线方程的纵截距,联立公式(4)和(5)建立方程组,求取初始振幅 E_0 和相位 θ 。

[0038] 本发明与现有技术相比,有益效果在于:

[0039] (1)本发明提供的基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法,通过正交通道与同相通道获取的数据经过低运算量可实现实时现场提取信号。

[0040] (2)本发明提供的基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置采用LC匹配网络提高检测灵敏度的同时,有效解决了前置放大器饱和的问题;

[0041] (3)本发明提供的基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置,采用多级硬件滤波,尤其是基于低截止频率的第一和第二低通滤波器可以有效抑制二级放大器饱和,且能够实现二级放大器的充分放大,而不必采用高转换位数的A/D采集卡,降低了成本;

[0042] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0043] 图1为本发明实施例提供的基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置;

[0044] 图2为本发明的主控模块的示意图。

[0045] 图3为本发明的LC匹配网络的电路图。

[0046] 图4为本发明一实施例测试装置。

具体实施方式

[0047] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0048] 参见图1示出了本发明的一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置的示意框图;一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置,该装置包括:接收线圈,LC匹配网络,前置放大器,带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,信号发生器,90°移相

器,第一乘法器,第二乘法器,第一低通滤波器,第二低通滤波器,同相二级放大器,正交二级放大器,A/D采集卡,主控模块。

[0049] 参见图2示出了本发明的主控模块的示意框图;主控模块包括DSP模块,FPGA模块,按键,显示器。

[0050] 其中,在连接关系上接收线圈1经LC匹配网络2与前置放大器3连接,前置放大器3经带宽200Hz中心频率可调带通滤波器4分别与第一乘法器7和第二乘法器8连接,第一乘法器7经第一低通滤波器9与同相二级放大器11连接,第二乘法器8经第二低通滤波器10与正交二级放大器12连接,同相二级放大器11和正交二级放大器12分别与A/D采集卡13连接,A/D采集卡13经主控模块14分别与信号发生器5和宽200Hz中心频率可调带通滤波器4连接,信号发生器5分别与第一乘法器7和90°移相器6连接,90°移相器6与第二乘法器8连接,DSP模块15分别与FPGA模块16,按键17和显示器18连接。

[0051] 接收线圈1,感应地下水产生的磁共振信号,并把该信号传送到LC匹配网络2;

[0052] 参见图3示出了本发明的LC匹配网络的电路图,所述LC匹配网络2由匹配电容C和LC无源滤波器构成,LC无源滤波器是由L1、C1、L2、C2、L3、C3构成的3阶II型滤波器,匹配电容与接收线圈实现谐振以提高信号幅度,LC无源滤波器压制噪声干扰以防止前置放大器3饱和;

[0053] 所述的前置放大器3对信号进行第一次放大,并把放大后的信号传递到带宽200Hz中心频率可调带通滤波器4;

[0054] 所述的带宽200Hz中心频率可调带通滤波器4是一个中心频率可调、带宽为200Hz的带通滤波器,中心频率受主控模块14调节,调节为拉莫尔频率,200Hz的带宽确保可以不失真的获取地面磁共振信号,进一步压制噪声;

[0055] 所述的第一乘法器7和第一低通滤波器9组成正交矢量型锁相放大器的同相通道,主控模块14通过控制信号发生器5产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器4的输出信号通过第一乘法器实现频率搬迁,再经过第一低通滤波器9消噪高频分量和大部分噪声,最后,主控模块控制A/D采集卡13获取同相二级放大器11进一步放大后的信号,采集到同相通道的原始数据;

[0056] 所述的第二乘法器8和第二低通滤波器10组成正交矢量型锁相放大器的正交通道,主控模块14通过控制信号发生器5产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相器6转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器4的输出信号通过第二乘法器8实现频率搬迁,再经过第二低通滤波器10消噪高频分量和大部分噪声,最后,主控模块控制A/D采集卡13获取正交二级放大器12进一步放大后的信号,采集到正交通道的原始数据;

[0057] 第一低通滤波器9和第二低通滤波器10均采用截止频率为20Hz的一阶低通滤波器,由于通带范围较小,频带外的噪声和信号都被有效滤除,有效解决了二级放大器饱和的问题,且经过低通滤波器输出的信号主要由地面磁共振信号构成,可以经过二级放大器进一步放大到低转换位数A/D能够识别的范围,进一步降低了装置成本。

[0058] 主控模块14由DSP模块15、FPGA模块16、按键17和显示器18构成,通过按键17和显示器18实现人机交互,除了完成上述调控工作外,一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取方法在所述的主控模块14上实现的,实时对采集的同相通道的原始数据和正交通道的

原始数据进行处理以快速提取信号,并把提取的信号显示在显示器18上。

[0059] 一种基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取方法,所述方法包括:

[0060] 通过接收线圈感应地下水产生的磁共振信号;

[0061] 磁共振信号经由带宽200Hz中心频率可调带通滤波器,所述中心频率为拉莫尔频率;

[0062] 产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过同相通道实现频率搬运;

[0063] 产生一个具有拉莫尔频率的余弦信号,再经过90°移相转换为正弦信号,该信号作为参考信号与带宽200Hz中心频率可调带通滤波器的输出信号通过正交通道实现频率搬运;

[0064] 采集同相通道和正交通道的信号,提取地面磁共振信号。

[0065] 同相通道的原始数据公式可表示为

$$[0066] \quad u_o(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t) - \exp(-\omega_c t)] \quad (1)$$

[0067] 磁共振信号的关键参数包括初始振幅 E_0 、平均弛豫时间 T_2^* 和相位 θ ,由于磁共振信号平均弛豫时间 $30 \leq T_2^* \leq 1000\text{ms}$,即 $1 < 1/T_2^* < 33.3$,且低通滤波器的截止频率为20Hz,相应的截止角频率为 $\omega_c = 125.65\text{rad/s}$,当采集时间大于10ms时, $\exp(-t/T_2^*) \gg \exp(-\omega_c t)$,此时采集的同相通道的原始数据公式可简化为

$$[0068] \quad f(t) = \frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)} [\exp(-\frac{1}{T_2^*}t)] \quad (2)$$

[0069] 对上式求对数,得到直线方程

$$[0070] \quad I(t) = \ln[f(t)] = -\frac{1}{T_2^*}t + \ln[\frac{0.5E_0 \cos(\theta)\omega_c}{(\omega_c - 1/T_2^*)}] \quad (3)$$

[0071] 首先,通过直线方程斜率 k 可以求取 $T_2^* = -1/k$,再通过直线方程的纵截距 $I(0)$ 获得二元一次方程

$$[0072] \quad \frac{\exp[I(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = 0.5E_0 \cos(\theta) \quad (4)$$

[0073] 同理,也可以得到的正交通道的一个二元一次方程

$$[0074] \quad \frac{\exp[Q(0)](\omega_c - 1/T_2^*)}{\omega_c} = -0.5E_0 \sin(\theta) \quad (5)$$

[0075] $Q(0)$ 是正交通道求对数后的直线方程的纵截距,联立公式(4)和(5)建立方程组,可求取 E_0 和相位 θ ,即通过简单计算快速提出有效的地面磁共振信号。

[0076] 实施例:

[0077] 利用如图4所示的测量装置对本发明所提出的基于锁相放大技术的地面磁共振信号快速提取装置及方法进行测试。可编程信号源通过电压衰减器在信号线圈中产生一个 $E_0 = 200\text{nV}$, $f_L = 2000\text{Hz}$, $T_2^* = 150\text{ms}$ and $\theta = 30^\circ$ 的人工磁共振信号,其表达式为 $e(t) = 200\exp(-t/0.15) \cos(2\pi \times 2000 \times t + 30^\circ)$,由于接收线圈与信号线圈平行放置,且采用同样匝数、线径和结构,所以在接收线圈中同样耦合了一个相同的磁共振信号,同时接收线圈耦合空

间电磁噪声,控制器通过同步触发器启动可编程信号源输出信号的同时,启动本发明所提出的快速提取装置。

[0078] 调节信号发生器和 90° 移相器输出的参考信号分别为频率为 $f_L=2000\text{Hz}$ 余弦信号和正弦信号,两个低通滤波器的阶数 1 和截止角频率 $\omega_c=125.67\text{rad/s}$ 。现场显示提取出的磁共振信号关键参数,其结果为 $E_0=194.65\text{nV}$, $T_2^*=152.78\text{ms}$ and $\theta=29.32^\circ$,与原始信号相比 E_0 , T_2^* 和 θ 的精度分别是 97.32% , 98.14% 和 97.73% ,获取了有效信号,而且可以实时处理并显示结果。

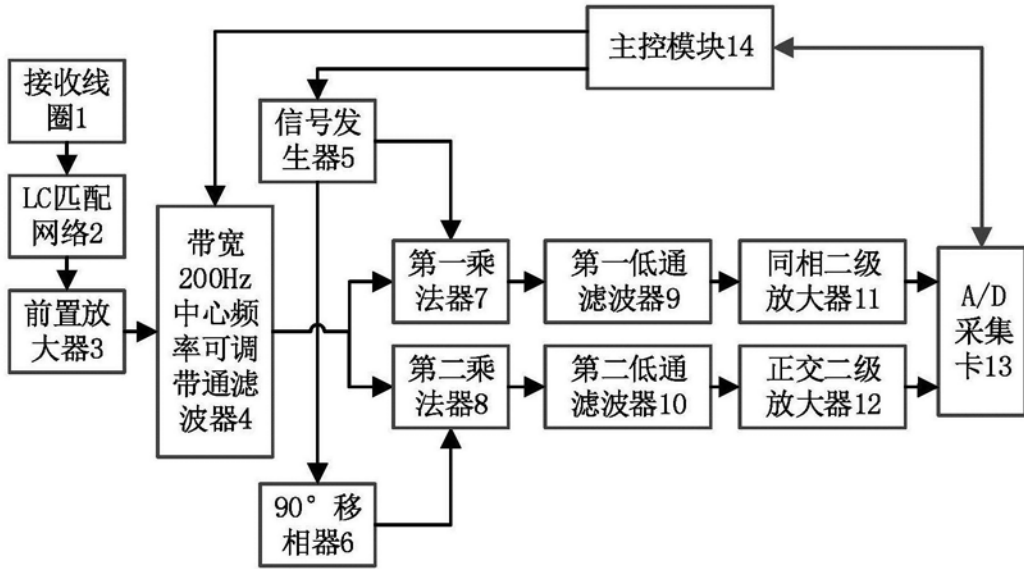


图1

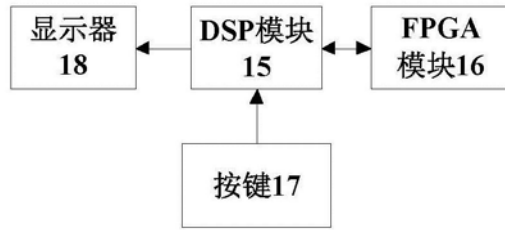


图2

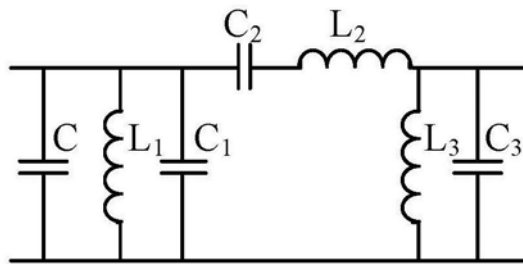


图3

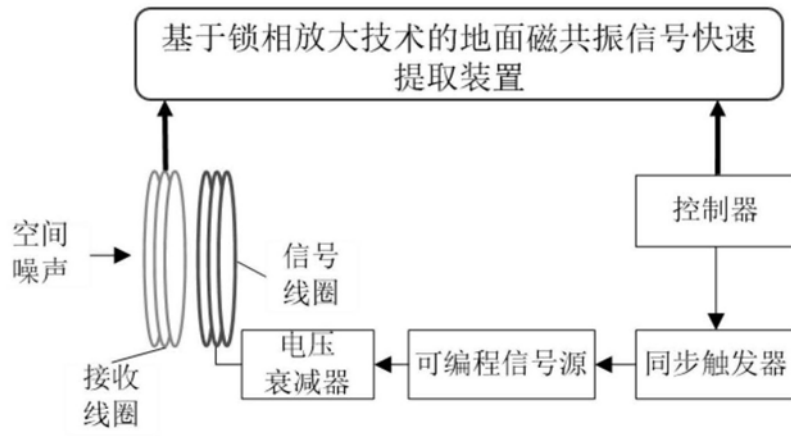


图4