

王浩,李军峰,刘俊杰,等. 航空瞬变电磁接收信号增益自动控制电路[J]. 电波科学学报,2019,34(4):524-530. DOI: 10.13443/j.cjors.2018120301
WANG H, LI J F, LIU J J, et al. Circuit of automatic gain control for airborne transient electromagnetic receiving signal[J]. Chinese journal of radio science,2019,34(4):524-530. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2018120301

航空瞬变电磁接收信号增益自动控制电路

王浩 李军峰 刘俊杰 吴珊 刘磊 曹展宏

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所自然资源部 地球物理电磁法探测技术重点实验室,廊坊 065000)

摘要 为了提高航空瞬变电磁信号的灵敏度,提出了一种通过压制线圈运动噪声和控制二次场增益的实现方法. 基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA),设计控制信号产生模块. 在此基础上设计信号调理输出电路,首先通过比较预设阈值电压,识别、去除运动噪声,然后时序控制放大二次场. 测试结果表明:该装置可以使接收信号波形的基线归零,并且能有效提高二次场增益.

关键词 航空瞬变电磁信号;二次场;线圈运动噪声;现场可编程门阵列(FPGA);时序控制

中图分类号 TN72

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2019)04-0524-07

DOI 10.13443/j.cjors.2018120301

Circuit of automatic gain control for airborne transient electromagnetic receiving signal

WANG Hao LI Junfeng LIU Junjie WU Shan LIU Lei CAO Zhanhong

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China)

Abstract In order to improve the sensitivity of the airborne transient electromagnetic signal, an implementation method of suppressing the coil motion noise and controlling the gain of the secondary field was proposed. Based on field programmable gate array (FPGA), the module of generating control signals was designed. On this basis, the circuit of signal conditioning was designed. Comparing with the preset threshold voltage, the motion noise was identified and removed, and the timing control was used to amplify the secondary field. The results show that the device can zero the baseline of the received signal waveform, and effectively increase the secondary field gain.

Keywords airborne transient electromagnetic signal; secondary field; coil motion noise; FPGA; timing control

引言

航空电磁探测作为一种高效快速的物探方法,通过飞机承载探测仪器利用不接地回线向地下发送一次场,在其激发下地下地质体中激励起的感应涡流将产生随时间变化的二次场. 利用接收线圈对二次场进行提取,实现对地质体的分析. 二次场从产

生到结束的时间是短暂的,因此又称为瞬变电磁信号^[1]. 瞬变电磁信号具有动态范围大、衰减快、频带宽的特点,对其进行全波形采样时,要求信号通道具备大动态范围,同时具备二次场微弱信号的程控放大或浮点放大能力^[2]. 且接收信号中存在很强的低频运动噪声的干扰,为提高二次场微弱信号的灵敏度,必须对运动噪声进行有效压制.

收稿日期: 2018-12-03

资助项目: 国家 863 计划(2017YFC0601900)

联系人: 李军峰 E-mail: lijunfeng@igge.cn

硬件补偿技术是通过补偿场去抵消一次场,从而有效提高二次场信号的动态范围和灵敏度.对于固定翼瞬变电磁系统,即使收发接收线圈的长度确定,范围一般在 80 m 至 150 m,也会受到风速、航向等因素的影响,收发线圈相对位置不会固定,导致硬件补偿技术无法实现^[3].浮点放大技术多应用地面瞬变电磁,在空中由于存在低频运动噪声,提升动态范围的作用不大^[4].高分辨率采样需通过数据处理技术提高灵敏度,然而高分辨模数转换器一般价格很高,加之高速和高分辨率不能兼顾,对二次场信号灵敏度的提升作用有限^[5].有些系统仅对二次场采样,即发射电流关断期间(off-time)的数据采集,可较大幅度地提高动态范围,但该方法缺失电流持续期间(on-time)的信息^[6].

本设计采用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)作为逻辑控制信号的产生模块来产生采样信号和时序控制信号,在此基础上对二次场波段不同时刻的信号进行采样.若前后两个时刻采样信号的差值大于设定阈值,即认为此刻具有很大的运动噪声,便在此时刻对波形进行采样.然后去除此采样时刻的运动噪声,使接收信号波形的基线归零,最后对二次场进行放大.这种方法能够实时识别运动噪声,不需要采集电路辅助,可以有效提高瞬变电磁信号的灵敏度,更符合航空瞬变电磁接收系统实时性、简便性的需求.

1 航空瞬变电磁信号及噪声分析

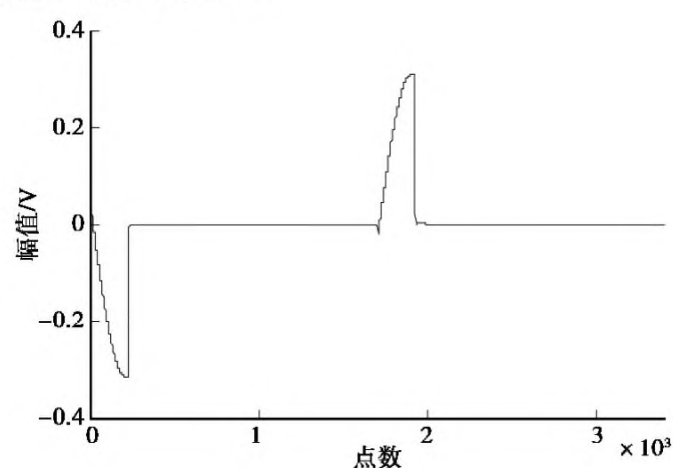
航空瞬变电磁信号是一种宽频带信号,且晚期数据的能量较弱,导致所测量的数据受到各种噪声的干扰,尤其是幅值较大的线圈运动噪声的干扰.如果不对运动噪声进行有效的压制,就会严重降低数据资料的质量.

1.1 航空瞬变电磁信号分析

图 1(a)、(b)分别是双极性半正弦发射信号和接收信号在一个周期内的仿真图.从图中可以看出,二次场信号相对一次场很微弱,并且信号的动态范围大,幅值从早期的几毫伏衰减到晚期的零点几微伏,同时信号早期衰减快、幅度高,晚期信号弱,为微伏级,且衰减慢^[7].

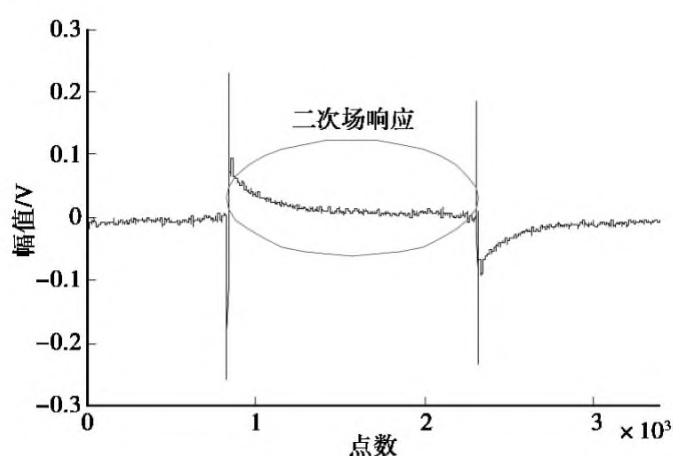
如果要提高二次场的增益并且保证一次场不失

真,需识别、区分一次场和二次场,最后对其进行时间域上的分段处理.



(a) 发射信号

(a) Transmitted signal



(b) 接收信号

(b) Received signal

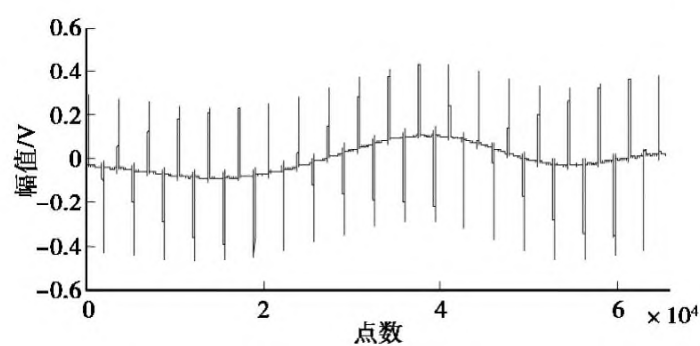
图 1 瞬变电磁信号分析

Fig. 1 Analysis of transient electromagnetic signal

1.2 线圈运动噪声分析

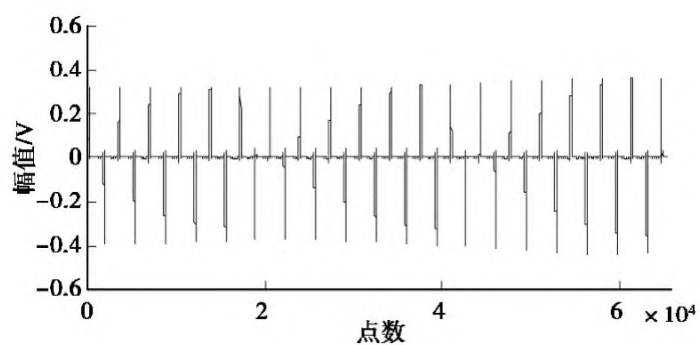
运动噪声是由于线圈在地磁场中切割磁力线导致接收线圈内磁通量变化而生成的感应电动势,因此非固定位置接收的瞬变电磁系统信号中普遍存在运动噪声.一般运动噪声的幅值要比其他噪声幅值高数倍甚至数十倍^[8],所以高精度的运动噪声去除方法对于信号质量的提高具有十分重要的意义.

图 2(a)、(b)分别是含运动噪声与无运动噪声数据的仿真图,可以看出运动噪声的频率低、幅值较大,这部分噪声电动势叠加在大地的电磁感应电动势曲线上使测得的电磁信号发生严重的基线漂移,降低电磁数据的信噪比,同时运动噪声的存在也限制了二次场信号的动态范围.



(a) 含运动噪声的信号

(a) Signal of coil motion noise



(b) 无运动噪声的信号

(b) Signal of coil motion noise removed

图 2 线圈运动噪声分析

Fig. 2 Analysis of coil motion noise

2 系统总体设计方案

针对一次场和运动噪声的存在导致二次场灵敏度低的问题,本文设计了如下解决方案:首先,根据运动噪声幅值较大的特点,通过比较前后时刻信号的幅值来识别运动噪声,弱化和消除运动噪声的影响;然后,在时间域上分离一次场和二次场,利用时序程控放大,提高二次场信号的灵敏度^[9]。

如图 3 所示,航空瞬变电磁接收信号增益自动控制电路主要由控制信号产生模块、接收信号调理输出模块组成。控制信号产生模块用于产生采样时刻信号和时序控制信号,接收信号调理输出模块利用控制信号对瞬变电磁接收信号进行一系列的处理,最终得到去噪放大后的信号。

下面结合图 3 对各个模块的连接作详细的说明。同步触发信号输入 FPGA 时序逻辑生成电路,将 FPGA 时序逻辑生成电路产生的信号分别输出到采样保持电路、运动噪声采样时刻产生电路和时序程控放大电路,作为以上各个电路的控制信号。接收信号分别输入低通滤波电路与波形基线调零电

路,经滤波后的信号送入采样保持电路。采样保持电路与运动噪声采样时刻产生电路相连接,采样保持电路的信号输出到运动噪声采样时刻产生电路,生成运动噪声的采样脉冲信号;运动噪声采样脉冲信号输入采样保持电路,得接收信号波形的基线需要调零的采样点信号。采样保持电路输出基线需归零的采样信号与接收信号同步输入到波形基线调零电路,得基线归零的接收信号。波形基线调零电路与时序程控放大电路相连接,将信号时序放大,最后输出。

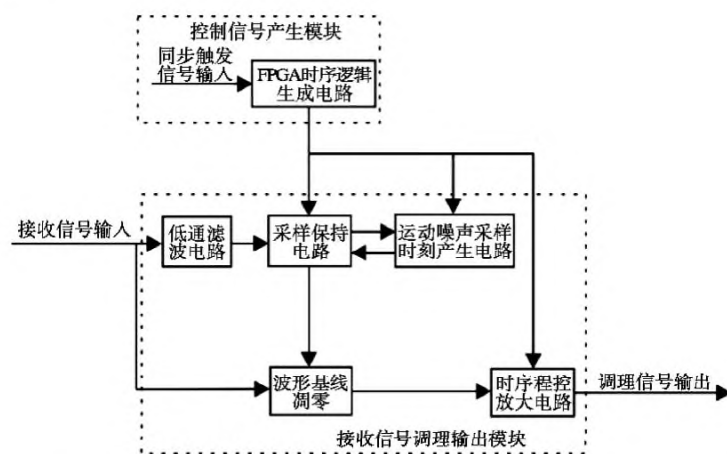


图 3 航空瞬变电磁接收信号增益自动控制系统

Fig. 3 Automatic gain control system for airborne transient electromagnetic receiving signal

2.1 控制信号产生模块

控制信号产生模块用于产生四路时序信号,包括三路采样信号和一路时序控制信号。采样信号是采样保持电路的采样脉冲信号,这里设定为前、中、后三个相邻时刻的采样信号,并且采样时刻均在二次场波段范围内。时序控制信号是时序程控放大电路的使能信号,其高低电平时间由一次场、二次场持续时间确定。

控制信号产生模块由 FPGA 实现,运用 Altium designer 来设计电路、Quartus II 来编写程序。设计难点在于程序的编写,本文采用状态机+计数器的方式实现。使用的状态机都是同步时序电路,由时钟信号触发状态的转换。应用计数器实现,即采用延时方法,先正确设定计数的时钟脉冲,当判断到有脉冲发生并且为有效触发时计数器开始计数,等计数器计满则输出电平状态^[10]。

下面以 TRIG2' 为例描述信号产生过程,其他三路信号类似,只是延时时间不同。状态转换图如图

4 所示,共有三种状态,分别是 WAITE_S0、DELAY_S1 和 HOLDEN_S2. 当系统被有效触发启动后,首先判断电路的复位信号 RST_B 是否有效,若有效,所有计数器清零,电路进入等待状态 WAITE_S0. 在 WAITE_S0 状态下输出低电平,并且等待触发信号的到来,一旦触发信号上升沿来到,则转入 DELAY_S1 状态. 进入 DELAY_S1 进行延时,延时时间由一次场持续时间确定. 当延时结束时,转入 HOLDEN_S2 状态,否则一直延时等待. 进入 HOLDEN_S2 状态输出高电平,持续时间由采样时间确定,计数器加满,则又回到等待状态 WAITE_S0.

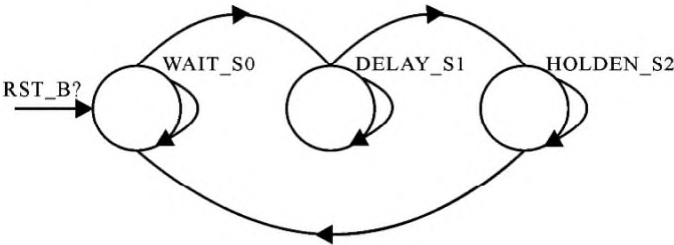


图 4 状态转换图

Fig. 4 Diagram of state transition

根据上面的分析,用 Verilog 语言来编写该状态机的实现过程,控制信号产生模块仿真波形如图 5 所示. TRIG1、TRIG2'、TRIG3 和 HOLD_CS 是由 FPGA 模块产生的四路控制信号,其中 TRIG1、TRIG2'、TRIG3 为前、中、后三个相邻时刻的采样信号,HOLD_CS 为时序控制信号,并且 HOLD_CS 信号中 t_1 、 t_2 分别是二次场持续时间、一次场持续时间.

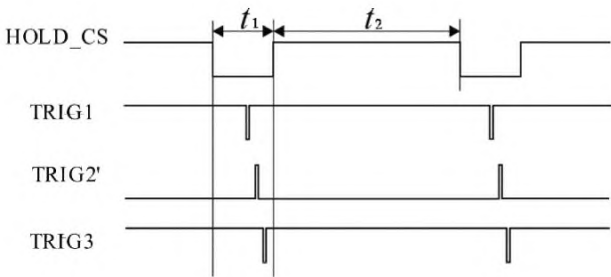


图 5 控制信号模块仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of control signal

2.2 接收信号调理输出模块

接收信号调理输出模块是根据瞬变电磁信号的特点,对其实施接收信号的波形基线调零处理和分段选择放大等措施,主要采用放大器、比较器、采样保持器和多路复用器等器件实现.

控制信号调理输出模块电路主要由低通滤波电路、采样保持电路、运动噪声采样时刻产生电路、波形基线调零电路和时序程控放大电路组成,其电路原理如图 6 所示. 首先,瞬变电磁接收信号 Vsig0 经过低通滤波电路得 Vsig,这里采用运放 A1 构建了截止频率为 1 kHz 的二阶有源低通滤波器来去除高频噪声. 然后,Vsig 经过采样时刻分别为 TRIG1、TRIG2 的采样保持器 U2、U3 得到原始信号的采样信号 Vsig1、波形基线需要归零时刻的采样信号 Vsig4,Vsig4 经过采样时刻为 TRIG3 的采样保持器 U4 后得 Vsig4 的采样保持信号 Vsig2,此信号用于和 Vsig1 进行比较. Vsig1、Vsig2 输入到以运放 A4、A5、A6 组成的减法器电路两端,差值信号输入比较器 A7、A8,对该差值信号进行比较,其中电位器 R17、R18 提供阈值电压,阈值设定为小于 10 mV. 比较器的输出信号输入到或门 U5,若差值大于阈值则产生一个采样使能的电平信号 EN,信号 EN 和采样信号 TRIG2'经过与非门 U6 得能识别波形基线需要归零的采样时刻 TRIG2. TRIG2 便对 Vsig 进行采样得到 Vsig4,原始接收信号 Vsig0、波形基线需要归零时刻的采样信号 Vsig4 经过以运放 A2 构成的减法器电路后,可以使接收信号波形的基线归零,差值信号一路直接输出到多路复用器 U1,另一路则输出到以运放 A3 组成的同相比例运算电路进行放大,放大后的信号再输入到多路复用器 U1,最后利用 HOLD_CS 对两路波形信号选择输出.

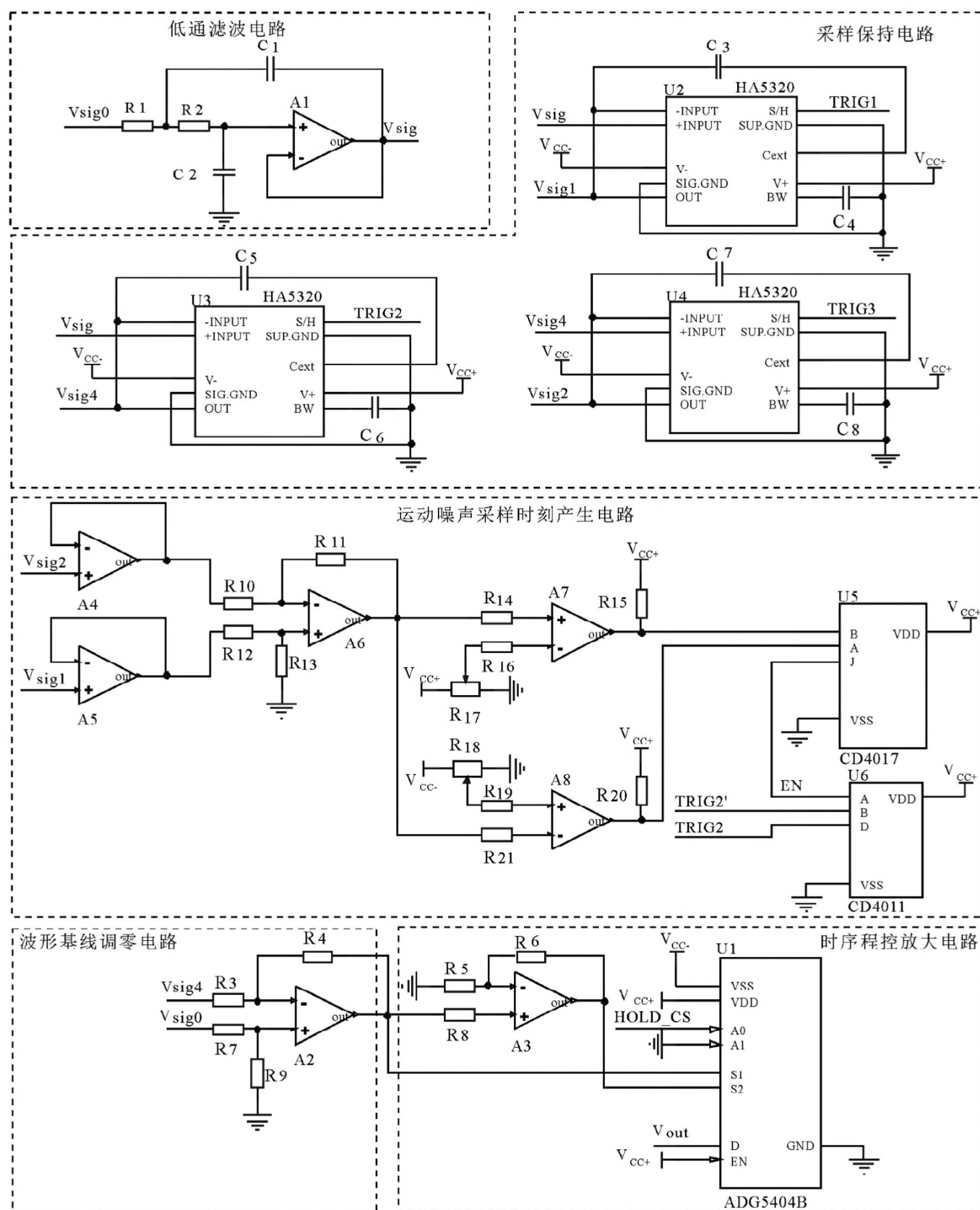


图 6 控制信号调理输出电路

Fig. 6 Circuit of signal conditioning

3 系统测试

本文选用 PC 机、TDS 2024B 示波器、Agilent 3320A 函数信号发生器、PS-305D 直流稳压电源等设备对航空瞬变电磁接收信号增益自动控制电路进行试验。其中,PC 机用于下载和调试 FPGA 程序,函数信号发生器用于产生模拟瞬变电磁信号。

本设计中二次场增益可调,通过改变电阻 R6 的阻值,调节二次场区段的放大倍数。为显著看到

放大效果,仿真试验时设定增益为 20 倍。图 7 是仿真测试结果,A 波形是模拟接收线圈输出的原始信号波形,该信号是由频率 25 Hz 幅值 3 V 的波形叠加频率 1 Hz 幅值 1 V 的正弦波得到;B 波形是经过调理电路输出的波形。

图 8 是实际试验结果,为避免放大倍数过大导致收录系统量程超格,实际试验设定增益为 10 倍。仿真和实际测试结果进行对比和分析,可以看到波形的基线都能准确归零;仿真试验中放大效果显著,

实际测试中二次场区域尖刺是早期道(从几十微秒到几百微秒,幅值从0.1 V左右衰减到毫伏级甚至微伏级)被放大的结果,也能很好地看到放大效果.本设计对运动噪声具有实际抑制作用,并且二次场的放大效果明显,增益显著提高,电路设计之初的性能全部实现.

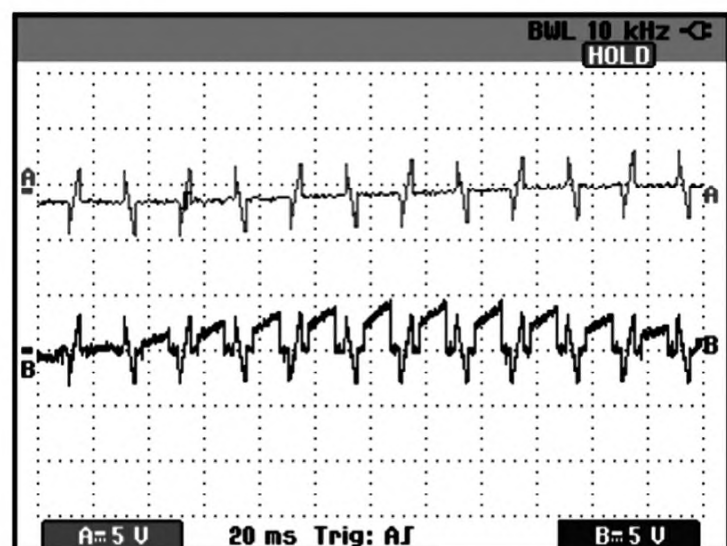
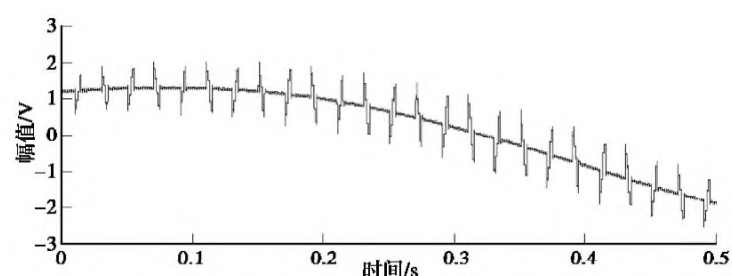


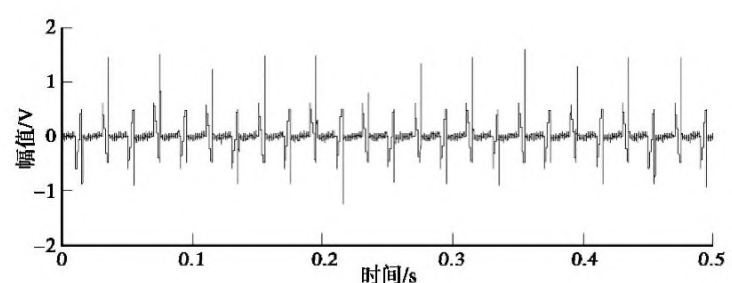
图7 仿真测试波形

Fig. 7 Waveforms of simulation test



(a) 接收线圈输出的原始信号波形

(a) Original signal



(b) 抑制运动噪声并放大后的信号

(b) Signal of coil motion noise suppressed and secondary field gain improved

图8 实际测试波形

Fig. 8 Waveforms of practical test

4 结 论

本文针对时间域航空电磁信号特点及接收线圈摆动形成噪声的问题,提出了一种基于瞬时采样取点和比较电路实现快速预判、及时调节增益的方法.首先定义了接收线圈运动噪声的概念,对接收线圈

运动噪声采样、比较、实时压制.时间域上分离一次场和二次场,提高二次场信号灵敏度.该电路可用于航空电磁信号的预处理阶段,具有输出信号参数可设置、可降低噪声、高灵敏度等特点,特别适用于动态范围大、全波形采样航空电磁勘探领域.

为实现瞬变电磁信号的精确处理,吊舱需获取发射机的同步信号.因此下一步将考虑在吊舱内利用接收信号提取同步脉冲信号,省去更改接收电缆的必要.

参考文献

- [1] 黄皓平. 航空电磁法在工程物探中应用的理论问题[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第七届学术年会论文集,1991:1.
- [2] 王玉阳,姚丽,韦静. 基于 HFSS 的瞬变电磁法发射线圈参数的仿真分析[J]. 现代电子技术,2013,36(5):157-160.
WANG Y Y, YAO L, WEI J. Simulation and analysis of parameters of transient electromagnet transmitting coil with HFSS [J]. Modern electronics technique,2013,36(5):157-160. (in Chinese)
- [3] 李军峰,刘凯飞,刘莹莹,等. 频率域航空电磁系统一次磁场自动补偿技术[J]. 物探与化探,2009,33(5):536-540.
LI J F, LIU K F, LIU Y Y, et al. The electromagnetic automatic compensation technology of the FAEM system [J]. Geophysical & geochemical exploration,2009,33(5):536-540. (in Chinese)
- [4] 庞丽丽,董翰川,史云. 时间域航空电磁微弱信号数据采集器的研制[J]. 自动化仪表,2014,35(4):83-86.
PANG L L, DONG H C, SHI Y. Research and development of the data collector for time domain aeronautical electromagnetic weak signal[J]. Process automation instrumentation, 2014, 35(4):83-86. (in Chinese)
- [5] 李鸿征,赵锋. 基于过采样的高精度宽动态范围次声信号采集系统[J]. 仪表技术与传感器,2015(5):62-64.
LI H Z, ZHAO F. High resolution and wide dynamic range infrasound signal acquisition system based on oversampling techniques [J]. Instrument technique and sensor,2015(5):62-64. (in Chinese)
- [6] 许洋钺,林君,李肃义. 全波形时间域航空电磁响应三维有限差分数值计算[J]. 地球物理学报,2012,55(6):2105-2114.
XU Y C, LIN J, LI S Y. Calculation of full-waveform airborne electromagnetic response with three-dimension

finite-difference solution in time-domain[J]. Chinese journal of geophysics, 2012, 55(6): 2105-2114. (in Chinese)

- [7] 马振军, 于景邨, 薛国强. 瞬变电磁有效信号最小时间影响因素实验研究[C]//中国地球物理学会. 2015 年中国地球科学联合学术年会论文集, 2015: 2520.

- [8] MUNKHOLM M. Motion-induced noise from vibration of moving TEM detector coil: characterization and suppression[J]. Journal of applied geophysics, 1997, 37: 21-29.

- [9] 党瑞荣, 李楠楠, 任志平. 瞬变电磁法测井信号调理电路设计[J]. 电气应用, 2011, 30(15): 67-70.

DANG R R, LI N N, REN Z P. Design of logging signal conditioning circuit for transient electromagnetic method[J]. Electrical application, 2011, 30(15): 67-70. (in Chinese)

- [10] 于晶, 杨晓慧, 黄勇. 基于 FPGA 的按键消抖电路设计方法的研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(22): 1-3.

YU J, YANG X H, HUANG Y. Methods of key-jitter elimination based on FPGA[J]. Electronic design engineering, 2011, 19(22): 1-3. (in Chinese)

作者简介



王浩 (1992—), 男, 河北人, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所助理工程师, 硕士, 研究方向为瞬变电磁接收系统仪器。

李军峰 (1972—), 男, 河北人, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所教授级高级工程师, 博士, 研究方向为航空地球物理勘查设备研发和应用。

刘俊杰 (1989—), 男, 河北人, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所工程师, 研究方向为瞬变电磁发射、接收系统仪器。