



严超,陈儒军,申瑞杰,等. 2021. 分布式多通道电法电磁法数据同步采集系统. 地球物理学进展, 36(4): 1743-1750. doi: 10.6038/pg2021CC0178.
YAN Chao, CHEN RuJun, SHEN RuiJie, et al. 2021. Distributed multi-channel data acquisition system for electrical and electromagnetic methods. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(4): 1743-1750. doi: 10.6038/pg2021CC0178.

分布式多通道电法电磁法数据同步采集系统

Distributed multi-channel data acquisition system for electrical and electromagnetic methods

严超,陈儒军*,申瑞杰,吴曦林,王小杰,陈兴生,刘海飞

YAN Chao, CHEN RuJun*, SHEN RuiJie, WU XiLin, WAN XiaoJie, CHEN XingSheng, LIU HaiFei

中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

摘要 采集系统是电磁法仪器的重要组成部分,设计出高精度、低功耗的分布式采集系统是电磁法仪器研制的重点和难点. 本文设计的采集系统集成 6 个采集通道,每个采集通道的 A/D 转换器都选用了 32 位的 ADS1282,并通过 DAC1282 来提供 ADS1282 校准和自检所需要的外部信号. 采集部分的控制中心选用了 MachXO2 ZE 系列这款功耗极低 CPLD. 为了保证同步采集的精度,设计中采用了 GPS 和 OCXO 协同授时的方案来提供同步时钟. 采集系统具备 MT、CSEM、SIP 等测量功能. 测试结果表明,本采集系统同步精度维持在 $1E-11$ 以下,待机状态下功耗为 0.32 W,运行功耗 2.76 W,各通道短路噪声值均在 μV 级,信噪比在 118 dB 附近,满足设计要求.

关键词 分布式采集系统;低功耗;电磁法;激电法

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2021CC0178

Abstract The data acquisition system is an important part of the electromagnetic instrument. Designing a high-precision, low-power distributed data acquisition system is a key and difficult point in the development of electromagnetic instruments. The data acquisition system designed in this paper integrates six data acquisition channels. The ADS1282 is selected for each acquisition channel's A/D converter, and external signals required for ADS1282 calibration and self-test are provided by DAC1282. The control center of the acquisition system uses the MachXO2 ZE series, a very low power CPLD. In order to ensure the accuracy of the synchronous acquisition, a GPS and OCXO cooperative timing scheme is adopted in the design to provide a synchronized clock. The acquisition system has measurement functions such as MT, CSEM, and SIP. The test results show that the synchronization accuracy of the acquisition system is maintained below $1E-11$. The power consumption is 0.32 W in standby mode, and 2.76 W in the operating state. The short circuit noise value of each channel in the level of μV , and the signal-to-noise ratio is near 118 dB. In summary, this system meets the design requirements.

Keywords Distributed acquisition system; Low power consumption; Electrical and electromagnetic methods; Spectral induced polarization

0 引言

电磁法勘探是一种重要的地球物理勘探方法(何继善, 1997; 薛国强, 2007). 目前电磁法理论日趋成熟,要实现深部电磁法勘探,必须设计出勘探深度大、精度高的电磁法仪器. 近些年来,电磁法仪器的发展趋势是一是要求高性能,具备多通道、高分辨率、高稳定性、低功耗等特点;二是由集中式采集向分布式采集转变(屈路等, 2013; 宋杰等, 2015; 柳建新等, 2017; 刘勇等, 2017). 采集系统是电磁法仪器的重要组成部分,采集系统的性能决定了电磁法勘探的最大勘探深度.

分布式多通道采集系统因其具有采集数据量大(Dean et al., 2016; Goldie, 2007)、抗干扰能力强(林君等, 2017; Liu et al., 2017; 杨洋等, 2018; 罗维斌等, 2017)、勘探范围大并可以实现大规模三维勘探等特点(Ahmed et al., 2018; He et al., 2018),广泛应用于电磁法仪器中.

在国内,电磁法仪器的研制一直是热点. 中国科学院研制了地面电磁探测系统(SEP)和大深度多功能电磁探测系统. SEP 实现了 CSAMT 和 MT 观测,24 位 A/D 转换,采集站总数可大于 200 道(底青云等, 2013);中国地质科学院廊坊物化探所研制的大深度多功能电磁探测系统采用 GPS + 石

收稿日期 2020-09-15; 修回日期 2021-05-14.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41774149)资助.

第一作者简介 严超,男,1992 年生,中南大学硕士研究生,主要研究方向为电法勘探仪器. E-mail: YChina_1992@163.com

* 通讯作者 陈儒军,男,1973 年生,中南大学副教授,主要研究方向为地球物理仪器及信号处理.

E-mail: churjun12358@gmail.com

英钟同步,可实现多种方法的测量,每个接收机有8个通道,采用24位A/D转换(林品荣等,2010,2015).中国地质大学研制的高精度地磁数据采集板采用CPLD+MCU控制方式,集成了4通道32位ADS1282(阎焜等,2015).陈凯等(2017)研制的海底可控源电磁接收机可完成5通道电磁场信号高精度数据采集、存储、高精度时间同步,在采样率为150 Hz时,通道动态范围可达126 dB以上.吉林大学开发了一套拟地震式的分布式深部电磁探测系统,分布式接收机由1个主控站和24个采集站组成,每个采集站集成了2个24位的采集通道(张文秀等,2012).中南大学何继善院士等人提出的广域电磁探测系统,以多个频率的伪随机电磁信号作为场源,接收机采集信号时高频段高速采集、低频段低速采集,采集通道采用的是24位的A/D转换器(何继善,2010;裴婧和蒋奇云,2010).陈儒军等基于GPS+恒温晶振同步、ZigBee无线网络、ARM嵌入式Linux系统研制了分布式电法和电磁法测量系统(Chen et al., 2010; 卢祥弘等, 2010; 淳少恒等, 2015; 宋杰等, 2015),最大支持200个采集站800通道

同步测量(Xi et al., 2014).上述系统在地热勘探和强电磁干扰下金属矿勘探中取得较好效果(He et al., 2016; Liu et al., 2017).

本文在考虑了电磁法勘探需求及前期电磁法仪器研制的基础上,结合当前电子测量技术和计算机技术的新发展,特别是GPS技术、二级频标、高性能微处理器、电力电子器件、32位 $\Delta-\Sigma$ ADC、可编程逻辑技术等(张帆等,2013; Xi et al., 2014; 高力和宋克柱,2017),进行了高精度时间同步、实时交互、高稳定性、低功耗、高效操作等关键技术研究,设计出符合实际勘探要求的分布式多通道电磁法采集系统.

1 采集系统的整体构成

电磁法接收机通常由采集系统和控制系统构成,控制系统一般采用嵌入式系统为控制核心(仇洁婷等,2011;王琴等,2014).这里控制系统的核心采用的是STM32微处理器.如图1所示,为采集系统的整体结构图.

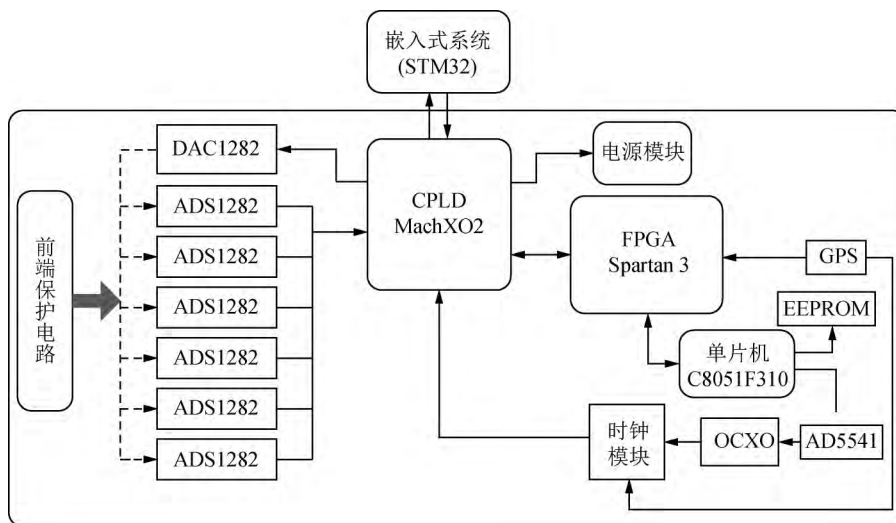


图1 多通道电磁法数据采集系统的原理框图

Fig. 1 Diagram of data acquisition system for electrical and electromagnetic methods

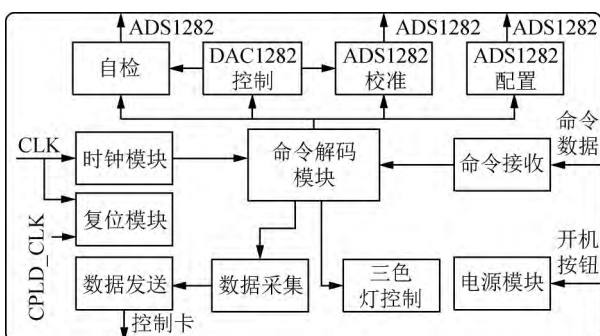


图2 电磁法数据采集用CPLD主要逻辑模块原理框图

Fig. 2 Diagram of main modules in CPLD for electrical and electromagnetic data acquisition

本采集卡主要由几个大的模块组成:前端保护电路、DAC1282、6通道ADS1282、CPLD模块、电源模块、同步模块.

前端保护电路用在电路的前端,保护后接的器件在雷电、过压或静电等情况下出现的瞬间高浪涌电压下不会被破坏.6通道的ADS1282负责将每通道的模拟信号转换为32位的数字信号,以完成具体的数据采集.每个ADS1282都由CPLD进行控制,以完成配置、校准、同步、数据读取等过程. DAC1282转换器可提供低失真、数字合成电压输出,用于提供ADS1282校准和自检所需要的外部输入信号. CPLD选用了Lattice公司MachXO2 2000ZE这款器件,该器件的特点是拥有灵活丰富的逻辑资源和超低功耗. CPLD作为控制中心,在采集系统中起到调度和控制的作用:(1)控制外围的ADS1282和DAC1282;(2)与外接的控制卡进行交互,接收命令和传输数据;(3)与同步模块交互;(4)控制电源模块和三色灯,起到软开关机的作用.同步模块作为一个整体由FPGA、单片机、GPS芯片、DAC转换器、恒温晶振(OCXO)、时钟模块、EEPROM构成.同步模块的设计采用的是GPS和

OCXO 协同授时, 可以提供精确的同步时钟, 用于同步采集.

2 基于 CPLD 的数据采集模块设计

CPLD 采用的是 Lattice(莱迪斯) 公司推出的 MachXO2-2000 ZE 这款产品, 可以满足低成本、低功耗和高系统集成的需求. 如图 2 所示为 CPLD 内主要模块结构图. CPLD 实现的主要功能是接收控制卡发送的命令、解码命令、控制 6 通道 ADS1282、控制 DAC1282、采集数据并发送给控制卡、控制开关电源等.

2.1 命令协议的设计

命令的接收和解码是采集系统的核心模块. CPLD 通过 SPI 串口接收控制卡发送的命令协议并进行分析, 然后使能相应的模块响应命令. 命令协议由双方事先约定, 并严格遵守其规范. 命令协议设计为 32 位: 4 bit 地址 + 28 bit 数据, 地址位决定了命令协议的类型, 数据位携带了需要传输的数据. 部分命令如表 1 所示.

表 1 CPLD 和 STM32 之间通讯命令
Table 1 Command between CPLD and STM32

地址位	命令类型
4 11	配置 ADS1282
4 12	校准 ADS1282
4 13	自检
4 14	停止自检
4 15	开始采集
4 16	停止采集
4 17	三色灯控制

2.2 ADS1282 的控制

ADS1282 是 TI 公司推出的一款 32 位超高性能的模数转换器 (ADC). 如图 3 所示为 ADS1282 内部结构图. 内部集成了一个双通道的输入选择器 (MUX), 一个低噪声可编程

的增益放大器 (PGA) 和可编程的数字滤波器. 转换器内部采用了 4 阶 $\Delta-\Sigma$ 调制器, 有出色的抗噪性能和线性度. 集成的可编程数字滤波器能够提供 250 SPS 到 4000 SPS 的数据采样率, 片上的 gain 和 offset 误差寄存器支持系统校准.

ADC 在采集数据时, 由于量化数据会引入两种误差, 一种是 gain 误差, 另一种是 offset 误差. 为了得到高精度的数据, 采集系统在采集数据前, ADS1282 需要进行校准来消除自身存在的误差. 图 4 为 CPLD 内实现的校准流程图. 当接收到校准命令后, 先区分是 offset 校准还是 gain 校准. 如果是 offset 校准, 则需要配置 CONFIG1 寄存器中 MUX [2:0] 的值为“010”, 即输入内部短路; 如果是 gain 校准, 则需要配置 CONFIG1 寄存器中 MUX [2:0] 的值为“001”, 即输入为 AINP2 和 AINN2(和 DAC1282 相连), 并且使能 DAC1282 的控制模块, 使其产生 ADS1282 此时 gain 值所对应的满量程电压. 然后拉高 SYNC 引脚, 再按照校准时序顺序发送命令, 每条命令都是 8 位的字节, 通过 SPI 串口发送给 6 通道的 ADS1282. 校准完成后, 需要恢复原先配置, 此时校准工作完成.

2.3 DAC1282 的控制

DAC1282 是 TI 公司推出的一款全集成数模转换器 (DAC), 可提供低失真, 可编程电压输出, 适用于高精度设备的测试. DAC1282 有四种工作模式: 正弦波, 直流, 脉冲和外部数据流输入.

图 5 为多通道 ADS1282 校准和自检系统的连接示意图, DAC1282 用于提供 ADS1282 校准和自检所需要的外部输入信号. ADS1282 校准分为 offset 校准和 gain 校准, offset 校准需要前端的差分电压为 0, gain 校准需要前端的差分电压达到不同增益值对应的满偏值. 自检需要外部提供不同频率和幅度的信号. DAC1282 可以同时满足 gain 校准和自检需要的输入信号. 设计中, ADS1282 校准采用的是直流 (DC) 输出模式, 自检采用的是正弦波 (Sine) 输出模式.

2.4 数据采集和发送

CPLD 在接收到采集数据的命令后, 使能前端的 6 通道

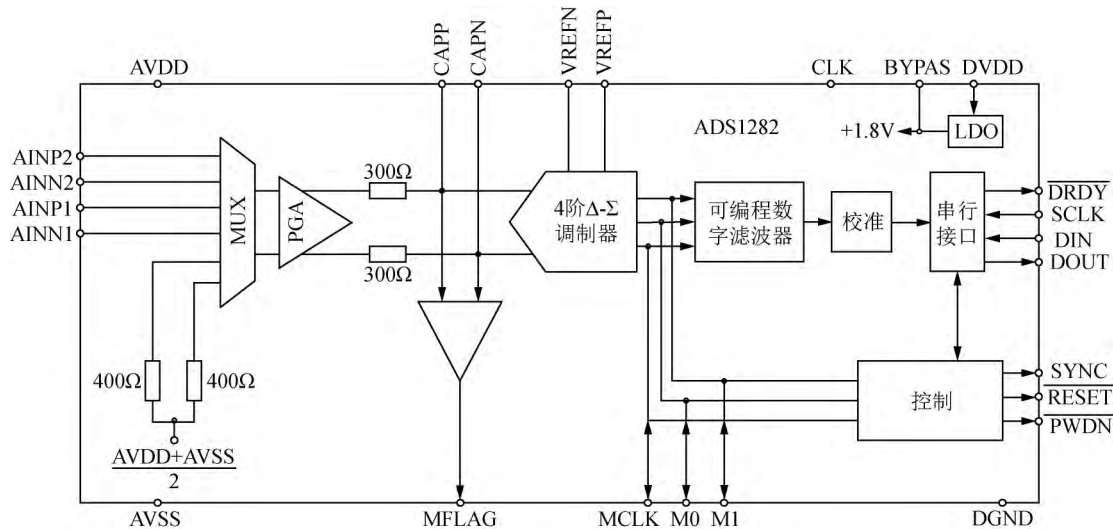


图 3 ADS1282 内部结构框图
Fig. 3 Block diagram of ADS1282

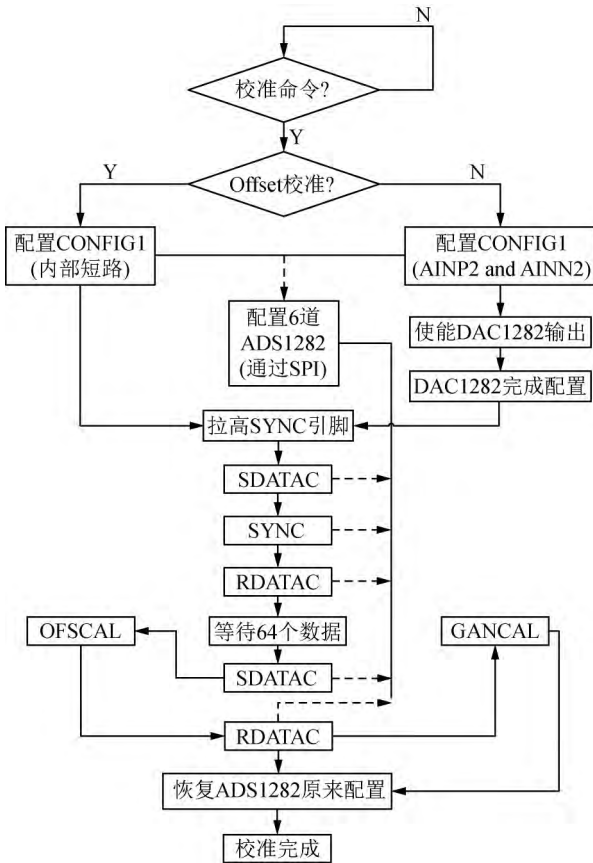


图4 ADS1282 校准流程框图

Fig. 4 Diagram of calibration process for ADS1282

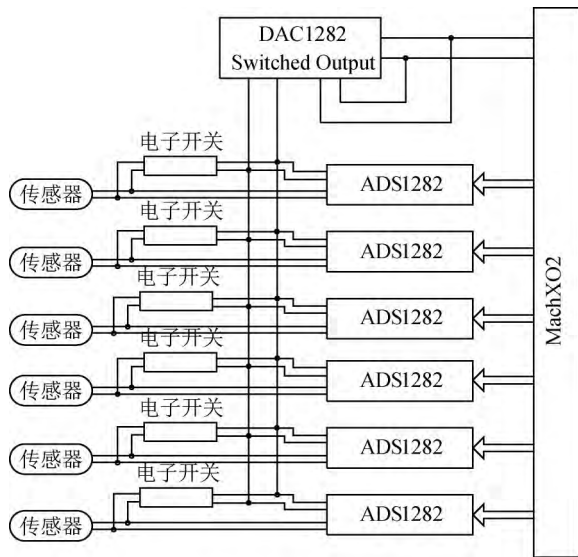


图5 基于 DAC1282 的校准和自检原理框图

Fig. 5 Diagram of calibration and self-check based on DAC1282

ADS1282 采集数据 并在采集完数据后 将数据通过 SPI 串口发送给控制卡的微处理器 STM32. 图6 为数据采集和发送的结构框图. ADS1282 的 DRDY——引脚拉低后表明数据已

准备好 这时 CPLD 产生 SCLK 信号 在 SCLK 的下降沿更新新数据 一位一位的从 DOUT 引脚移出数据. 如果 6 通道同时采集 就会得到 6 个 32 位的数据. 得到数据后需要将所有数据传输给控制卡 传输接口采用了 SPI 串口. SPI 串口只能按位传输 所以 6 通道的缓存数据需要按顺序发送. 因为 ADS1282 的最高采样率只有 4000 SPS 只要 SPI 的 SCLK 时钟频率大于 768 kHz 就不会造成缓存数据在没发送完之前被覆盖.

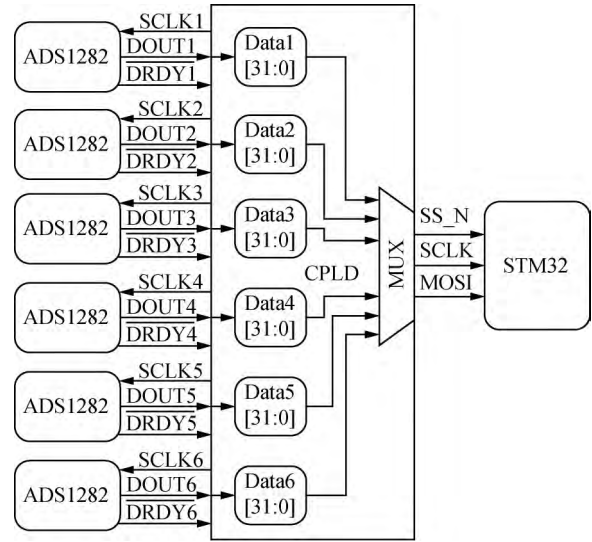


图6 数据采集和发送结构框图

Fig. 6 Block diagram of data acquisition and transmission

3 同步系统的设计

对于分布式采集系统 每个通道和每个采集站点采集的数据都要保持严格的同步 如果出现一点偏差 将会出现很大的误差 所以高精度和稳定性好的同步模块是分布式采集系统的重要组成部分(严发宝等 2017; 张天信等 2017) 设计中常采用 GPS 或二级频标来提供同步源(Chen et al. , 2010; 淳少恒等 2015; 于生宝等 2016) .

同步授时系统整体设计如图7所示. GPS 接收芯片发出 GPS 信息和 PPS 信号 在 FPGA 内对 GPS 信息解码 判断接收到的 GPS 授时信号是否有效 在 GPS 锁定的情况下 利用 PPS 作为标准参考源 计算 OCXO 产生的 10 MHz 时钟信号与标准参考源之间的间隔值. 再将 FPGA 内测量得到的粗测量值和细测量值分别传输给单片机 计算得出准确的钟差差值 然后通过滑动平均和卡尔曼滤波算法对数据进行处理. 为了得到恒温晶振的精准控制量 在单片机内实现了多档位调节和 PID 控制结合的控制算法 并通过单片机将控制数据传输给 D/A 转换器 得到本地恒温晶振所需要修正的压控电压. 单片机外接了一个 EEPROM 目的是为了存储恒温晶振稳定时的控制数据和此时 GPS 发出的时间信息. 在下次上电时首先读取 EEPROM 里面保存的数据 一是将读取的控制数据作为上电后恒温晶振的控制量; 二是利用读取的时间信息判断是否需要等待恒温晶振加热(卢祥弘等, 2010) .

4 性能测试

图8为采集卡的实体调试图. 采集卡电路板为8层电路板, 尺寸为128 mm × 176 mm.

4.1 同步性能测试

图9为OCXO未校准状态下的频率精度和被驯服时的频率精度在12 h内的变化. 其中, 未校准状态下初始校准量设定为44470, 即在此过程中保持输入到D/A的数据不变, 44470为上次恒温晶振锁定时保存的控制量. 由图可以看出, 恒温晶振在未校准的状态下, 频率精度在 $1E-9$ 上下波动, 这远不能满足高精度同步的要求. 对比恒温晶振被驯服

时的精度变化曲线. 恒温晶振在开始上电时, 精度差且波动大. 本系统可以在比较短的时间内让恒温晶振频率达到比较高的精度, 并长时间保持在高精度的范围. 除去刚开始校准时的0.5 h内的数据, 恒温晶振在驯服状态下12 h内的平均精度达到 $-2.87E-12$, 最大波动为 $2.09E-10$, 相对于采用的恒温晶振 ± 0.5 ppb/d的老化率有了明显改进.

4.2 噪声测试

表2为采集卡6个通道在采样率为1000 SPS, 增益值为1时的噪声数据整理表. 由表可以看出, 采集卡的整体短路噪声比较小, 数量级均在 μV 级, 各个通道的短路噪声只有细微差距, 满足设计要求.

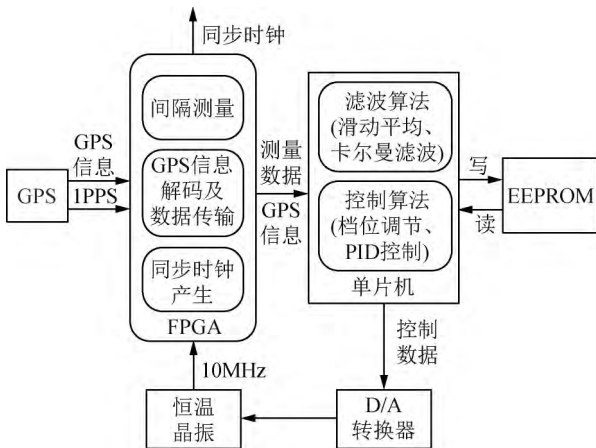


图7 GPS驯服OCXO同步原理框图

Fig. 7 Block diagram of GPS disciplined OCXO

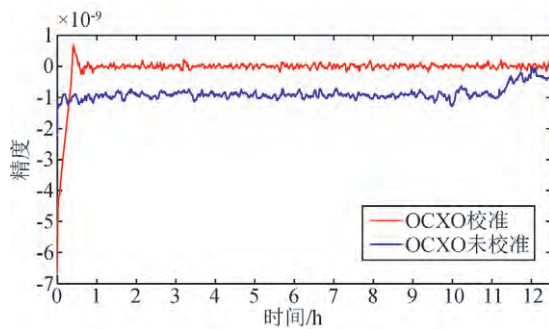


图9 OCXO未校准时和校准状态下的频率精度对比

Fig. 9 Comparison of frequency accuracy between disciplined OCXO and un-disciplined OCXO

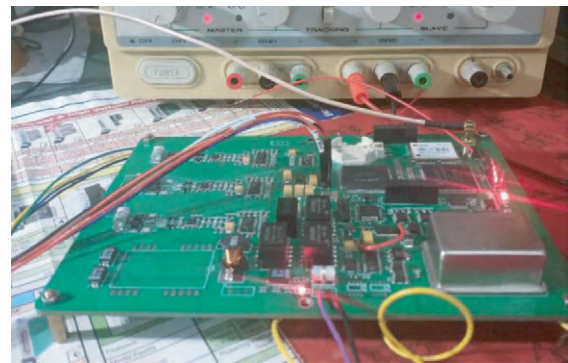


图8 采集卡样机实体调试图

Fig. 8 Prototype of acquisition system board in debugging

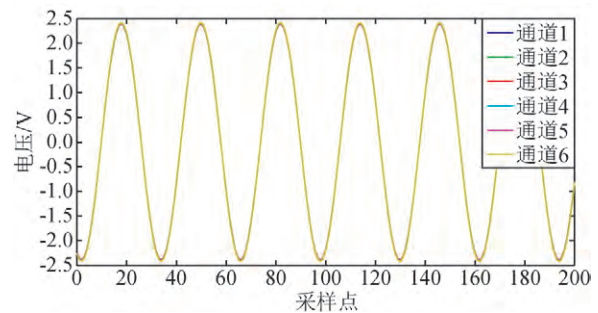


图10 正弦信号采集测试图

Fig. 10 Test of sine signal input

表2 短路输入噪声(1000 SPS, PGA = 1)

Table 2 Shorted input noise (1000 SPS, PGA = 1)

	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6
平均值	-5.7e-008	-1.7e-008	-4.3e-008	-4.9e-008	-4.4e-008	-2.8e-008
最大值(绝对值)	7.6e-006	7.3e-006	6.4e-006	4.6e-006	7.4e-006	9.2e-006
均方根值	2.3e-006	2.1e-006	1.87e-006	1.82e-007	2.2e-006	2.2e-006
等效输入噪声/(nv/\sqrt{Hz})	71.7	68.0	59.2	57.6	68.0	69.7

表3 通道1不同配置时等效短路输入噪声(nv/\sqrt{Hz})Table 3 The equivalent shorted input noise in different configurations of channel 1 (nv/\sqrt{Hz})

	PGA = 1	PGA = 2	PGA = 4	PGA = 8	PGA = 16	PGA = 32	PGA = 64
250SPS	73.3	44.4	23.9	14.9	10.7	9.4	8.3
500SPS	74.7	44.9	23.0	14.7	9.8	8.2	8.0
1000SPS	71.7	46.1	22.7	14.4	8.7	7.4	6.5
2000SPS	74.0	46.4	24.9	14.0	8.2	6.3	5.4
4000SPS	75.6	43.5	25.0	14.6	8.1	6.1	4.9

采集通道的短路输入噪声和 ADC 的配置有关. 不同的增益值和采样率对噪声值的大小有一定的影响. 表3为通道1配置不同的增益值和采样率时的等效噪声,单位为 nv/\sqrt{Hz} .

由表3可以看出,增益值相同时,不同的采样率的等效输入噪声几乎是相同的,这也意味着采样率越大,对应的噪声值越大.这是由于采样率越低,采集系统的带宽越小,1/f噪声的影响越大.

4.3 信号采集测试

为了对各个采集通道的信号采集能力进行测试,信号采集测试通过DAC1282产生频率为31.25 Hz,幅度为 ± 2.5 V的正弦波,将其输入到AD前端,接收6个通道采集的数据.在测试前,配置ADS1282的采样率为1000 SPS,PGA=1.测试结果如图10所示.

从上图中可以看出6个通道采集的数据曲线吻合度非常高,几乎没有偏差,说明通道间的一致性和同步性能很高.表4为各通道信噪比值.从测试结果来看,在1000SPS采样率和PGA=1的设置下,本采集卡6个通道的信噪比值都在118 dB附近.

表4 各通道信噪比值(1000 SPS, PGA=1)

Table 4 Signal-to-noise ratio of each channel (1000 SPS, PGA=1)

	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6
SNR/dB	117.35	118.22	119.14	119.42	117.75	117.81

4.4 功耗测试

采集卡待机时只有CPLD模块上电,此时功耗为0.32 W.采集卡全部模块工作时,功耗为2.76 W.控制卡插接在采集卡上后,接收机整体稳定工作时的功耗为3.24 W,实现了低功耗采集.

5 结论

本文设计了一种高精度低功耗的分布式采集系统,具备多功能,可以应用于MT、CSEM、SIP等方法.采集系统集成了6个32位A/D转换的采集通道,保证了足够的采集能力.并且从测试结果来看,每个采集通道的短路噪声低,信噪比高,通道间的一致性很强,可以保证采集数据的质量.由于采用了超低功耗的CPLD作为控制中心,可以有效降低整个采集系统的功耗.GPS和OCXO协同授时可以保证在野外各种环境

下多个采集站的同步.本采集系统在参考目前主流的采集系统的同时,着眼于实际的应用环境,具有重要的现实意义.

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

- Ahmed A S, Revil A, Jardani A, *et al.* 2018. 3D geostatistical inversion of induced polarization data and its application to coal seam fires [J]. *Geophysics*, 83(3): 1-59, doi: 10.1190/geo2017-0232.1.
- Chen K, Jing J E, Zhao Q X, *et al.* 2017. Ocean bottom EM receiver and application for gas-hydrate detection [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 60(11): 4262-4272, doi: 10.6038/cjg20171114.
- Chen R J, He Z X, Qiu J T, *et al.* 2010. Distributed data acquisition unit based on GPS and ZigBee for electromagnetic exploration [C]. // 2010 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Austin: IEEE, 981-985.
- Chun S H, Chen R J, Xiang B W, *et al.* 2015. Frequency correction method of OCXO and its application in the data acquisition of electrical prospecting [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 30(4): 1870-1881, doi: 10.6038/pg20150448.
- Dean T, Brice T, Hartog A, *et al.* 2016. Distributed vibration sensing for seismic acquisition [J]. *Leading Edge*, 35(7): 525-648, doi: 10.1190/le35070600.1.
- Di Q Y, Fang G Y, Zhang Y M. 2013. Research of the surface electromagnetic prospecting (SEP) system [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56(11): 3629-3639, doi: 10.6038/cjg20131104.
- Gao L W, Song K Z. 2017. Design of geophysical detection node distributed system based on GPS clock synchronization [J]. *Electronic Measurement Technology (in Chinese)*, 40(1): 105-109, doi: 10.3969/j.issn.1002-7300.2017.01.022.
- Goldie M. 2007. A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada [J]. *Leading Edge*, 26(2): 180-183, doi: 10.1190/1.2542448.
- He J S. 1997. Development and prospect of electrical prospecting. [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 40(S1): 308-316.
- He J S. 2010. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology) (in Chinese)*, 41(3): 1065-1072.
- He L F, Chen L, Dorji, *et al.* 2016. Mapping the geothermal system using AMT and MT in the Mapamyum (QP) field, lake Manasarovar, Southwestern Tibet [J]. *Energies*, 9(10): 855-868, doi: 10.3390/en9100855.
- He L F, Chen L, Dorji, *et al.* 2018. Mapping chromite deposits with audio magnetotellurics in the Luobusa ophiolite of southern Tibet [J]. *Geophysics*, 83(2): 1MA-Z8, doi: 10.1190/geo2017-0110.1.
- Lin J, Zhang X P, Wang J Q, *et al.* 2017. The techniques and method for multi-hop seismic data acquisition based on compressed sensing

- [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(11): 4194-4203, doi: 10.6038/cjg20171107.
- Lin P R, Guo P, Shi F S, *et al.* 2010. A study of the techniques for large-depth and multi-functional electromagnetic survey [J]. Acta Geoscientia Sinica (in Chinese), 31(2): 149-154.
- Lin P R, Zheng C J, Wu W L, *et al.* 2015. Techniques and systems for large-depth and multi-function electromagnetic survey [J]. Geological Survey of China (in Chinese), 2(8): 60-66, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2015.08.010.
- Liu J X, Yan F B, Su Y R, *et al.* 2017. Research status and development trend of the portable near-surface FDEM instrument [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(11): 4352-4363, doi: 10.6038/cjg20171123.
- Liu W Q, Chen R J, Cai H Z, *et al.* 2017. Correlation analysis for spread-spectrum induced-polarization signal processing in electromagnetically noisy environments [J]. Geophysics, 82(5): E243-E256, doi: 10.1190/geo2016-0109.1.
- Liu Y, Tuo X G, Li H L, *et al.* 2017. Design of multi-wave broadband seismic data acquisition and key technology [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(11): 4302-4312, doi: 10.6038/cjg20171118.
- Lu X H, Chen R J, He Z X. 2010. The design of frequency calibration system for OCXO based on FPGA [J]. Electronic Technology and Application (in Chinese), 2010(7): 101-104, doi: 10.3969/j.issn.0258-7998.2010.07.035.
- Luo W B, Li M, Chen R J. 2017. Induced polarization method based on circular cross-correlation method and field experiment [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(3): 1393-1398, doi: 10.6038/pg20170359.
- Pei J, Jiang Q Y. 2010. Wide-field electromagnetic receiver acquisition design based on AD7762 [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(3): 1110-1114, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.053.
- Qiu J T, Chen R J, He Z X. 2011. The review of embedded system applied in electromagnetic prospecting instrument [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(2): 746-753, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.047.
- Qu L, Yu S B, Gao M L. 2013. Design of receiver system for distributed transient electromagnetic [J]. Instrument Technology and Sensor (in Chinese), 1(8): 83-85, 95.
- Song J, Chen R J, Chou J T, *et al.* 2015. Design and implementation of control system for distributed data acquisition in electrical method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 37(6): 699-704, doi: 10.3969/j.issn.1001-749.2015.06.05.
- Wang Q, Jiang Q Y, He S. 2014. The application of ARM system to the wide field electromagnetic receivers [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 11(5): 665-672, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.05.017.
- Xi X L, Yang H C, Zhao X F, *et al.* 2014. Large-scale distributed 2D/3D FDIP system based on ZigBee network and GPS [C]. // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Boston: Boston Marriott Copley Place, 130-139.
- Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2007. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.04.026.
- Yan F B, Liu J X, Su Y R, *et al.* 2017. A study on uncertainty and error of sampling clock in electromagnetic prospecting systems [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(11): 4204-4211, doi: 10.6038/cjg20171108.
- Yan K, Yuan Z Z, Han X, *et al.* 2015. The design of high precision geomagnetic data acquisition board [J]. Electronic Design Engineering (in Chinese), 23(3): 79-82, doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2015.03.027.
- Yang Y, He J S, Li D Q. 2018. A noise evaluation method for CSEM in the frequency domain based on wavelet transform and analytic envelope [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(1): 344-357, doi: 10.6038/cjg2018L0298.
- Yu S B, He J L, Su F, *et al.* 2016. Design of high precision synchronization system for electromagnetic instruments [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) (in Chinese), 47(12): 4034-4039, doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.12.011.
- Zhang F, Chen K, Zhu Z P, *et al.* 2013. Design and realization of frequency calibration system for OCXO based on GPS [J]. Electronic Design Engineering (in Chinese), 21(08): 91-94, doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.08.028.
- Zhang T X, Wang Z X, Wu S J, *et al.* 2017. Research of low time drift and automatic gain data acquisition of marine electromagnetic [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(11): 4165-4173, doi: 10.6038/cjg20171104.
- Zhang W X, Lin J, Liu L C, *et al.* 2012. Design and implementation of broadband data acquisition system for distributed electrical exploration [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) (in Chinese), 42(6): 1426-1431, doi: 10.13229/j.cnki.jdxgxb2012.06.003.

附中文参考文献

- 陈凯, 景建恩, 赵庆献, 等. 2017. 海底可控源电磁接收机及其水合物勘查应用 [J]. 地球物理学报, 60(11): 4262-4272, doi: 10.6038/cjg20171114.
- 淳少恒, 陈儒军, 向博文, 等. 2015. OCXO 时钟修正机制在电法勘探采集中的应用研究 [J]. 地球物理学进展, 30(4): 1870-1881, doi: 10.6038/pg20150448.
- 底青云, 方广有, 张一鸣. 2013. 地面电磁探测系统(SEP)研究 [J]. 地球物理学报, 56(11): 3629-3639, doi: 10.6038/cjg20131104.
- 高力为, 宋克柱. 2017. GPS 时钟同步的分布式地球物理探测系统设计 [J]. 电子测量技术, 40(1): 105-109, doi: 10.3969/j.issn.1002-7300.2017.01.022.
- 何继善. 1997. 电法勘探的发展和展望 [J]. 地球物理学报, 40(S1): 308-316.
- 何继善. 2010. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(3): 1065-1072.
- 林君, 张晓普, 王俊秋, 等. 2017. 基于压缩感知的多跳地震数据采集技术与方法 [J]. 地球物理学报, 60(11): 4194-4203, doi: 10.6038/cjg20171107.
- 林品荣, 郭鹏, 石福升, 等. 2010. 大深度多功能电磁探测技术研究 [J]. 地球学报, 31(2): 149-154.
- 林品荣, 郑采君, 吴文鹏, 等. 2015. 大深度多功能电磁探测技术与系统集成 [J]. 中国地质调查, 2(8): 60-66, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2015.08.010.
- 柳建新, 严发宝, 苏艳蕊, 等. 2017. 便携式近地表频率域电磁法仪器研究现状与发展趋势 [J]. 地球物理学报, 60(11): 4352-4363, doi: 10.6038/cjg20171123.
- 刘勇, 虞先国, 李怀良, 等. 2017. 一种多波宽频地震数据采集设计与仪器实现关键技术 [J]. 地球物理学报, 60(11): 4302-4312, doi: 10.6038/cjg20171118.
- 卢祥弘, 陈儒军, 何展翔. 2010. 基于 FPGA 的恒温晶振频率校准系统的设计 [J]. 电子技术应用, (7): 101-104, doi: 10.3969/j.issn.0258-7998.2010.07.035.
- 罗维斌, 李梅, 陈儒军. 2017. 相关辨识谱激电法及野外实验 [J]. 地球物理学进展, 32(3): 1393-1398, doi: 10.6038/pg20170359.
- 裴婧, 蒋奇云. 2010. 基于 AD7762 的广域电磁接收机采集器设计 [J]. 地球物理学进展, 25(3): 1110-1114, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.053.
- 仇洁婷, 陈儒军, 何展翔. 2011. 嵌入式系统在电磁法勘探仪器中的

- 应用概述[J]. 地球物理学进展, 26(2): 746-753, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.047.
- 屈路, 于生宝, 高明亮. 2013. 分布式瞬变电磁接收系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 1(8): 83-85, 95.
- 宋杰, 陈儒军, 仇洁婷, 等. 2015. 分布式电法采集站控制系统的设计与实现[J]. 物探化探计算技术, 37(6): 699-704, doi: 10.3969/j.issn.1001-4749.2015.06.05.
- 王琴, 蒋奇云, 贺帅. 2014. 广域电磁接收机中 ARM 系统的应用[J]. 工程地球物理学报, 11(5): 665-672, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.05.017.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.04.026.
- 严发宝, 柳建新, 苏艳蕊, 等. 2017. 电磁法观测系统采样时钟不确定度及误差研究[J]. 地球物理学报, 60(11): 4204-4211, doi: 10.6038/cjg20171108.
- 阎焜, 袁振中, 韩雪, 等. 2015. 高精度地磁数据采集板的设计[J]. 电子设计工程, 23(3): 79-82, doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2015.03.027.
- 杨洋, 何继善, 李帝铨. 2018. 在频率域基于小波变换和 Hilbert 解析包络的 CSEM 噪声评价[J]. 地球物理学报, 61(1): 344-357, doi: 10.6038/cjg2018L0298.
- 于生宝, 何建龙, 苏发, 等. 2016. 电磁法仪器高精度 GPS 同步系统设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 47(12): 4034-4039, doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.12.011.
- 张帆, 陈锴, 朱正平, 等. 2013. 基于 GPS 的恒温晶振频率校准系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 21(08): 91-94, doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.08.028.
- 张天信, 王中兴, 吴树军, 等. 2017. 海洋电磁低时钟漂移及自动增益采集技术研究[J]. 地球物理学报, 60(11): 4165-4173, doi: 10.6038/cjg20171104.
- 张文秀, 林君, 刘立超, 等. 2012. 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), 42(6): 1426-1431, doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb2012.06.003.